



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ILKKA KESKI-SAARI
PINTAVESILAITOKSEN SANEERAUS – TAPAUSESIMERKKINÄ
JOUPPILANVUOREN LAITOS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jukka Rintala
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
22. tammikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

ILKKA KESKI-SAARI: Pintavesilaitoksen saneeraus – tapausesimerkkinä Jouppilanvuoren laitos

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 54 sivua, 3 liitesivua

Tammikuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Yhdyskuntien ympäristötekniikka

Tarkastaja: professori Jukka Rintala

Avainsanat: pintavesi, vedenkäsittely, kalkkikivialkalointi, saostuskemikaalit, mixed bed-suodatus, flotaatioselkeytys

Tutkimuksessa vertailtiin eri vaihtoehtoja pintaveden puhdistamiseksi talousvesikäyttöön keskittyen raakaveden hankintaan, saostuskemikaalin valintaan sekä kemiallisen jälkialkaloinnin korvaamiseen hiekkasuodattimiin lisättävällä kalkkikivellä. Tutkimuksen tavoite oli varmentaa eräitä Jouppilanvuoren vesilaitoksen saneeraussuunnittelun keskeisiä lähtötietoja.

Talousveden alkaloinnin tavoitteena on estää verkoston korroosiota sen käyttöä pidentämiseksi ja veden laatuhaittojen minimoimiseksi. Kalkkikivialkalointi on yksinkertainen ja turvallinen alkalointimenetelmä, joka vaatii vähän huoltotoimenpiteitä. Menetelmän heikkoutena ovat kalkkikivisuodattimesta mahdollisesti aiheutuvat mikrobiologiset laatuongelmat. Mixed bed-suodattimen suodatinmassassa on sekaisin useampaa suodatusmateriaalia, esimerkiksi hiekkaa ja kalkkikiveä.

Työn kokeellisessa osassa oli kolme vaihetta: laboratoriomittakaavan saostuskokeet, koe-laitteistolla tehdyt pilot-ajot, joissa tutkittiin sekä saostusta että erilaisia suodatinmassoja, ja varmentavat koeajot laitosmittakaavassa. Kokeissa saavutettuja käsittelytuloksia mitattiin raakavedestä, selkeytetystä vedestä ja suodatetusta vedestä otetuista näytteistä tehdyin laboratorioanalysein. Tulosten tarkastelussa vertailtiin saavutettuja tuloksia aiempiin tutkimuksiin sekä talousvesiasetuksen talousveden laadulle antamiin vaatimuksiin ja suosituksiin.

Raakaveden ottopaikan vaihtaminen arvioitiin käsittelyprosessin toimintavarmuuden ja helppokäyttöisyyden kannalta järkeväksi, koska Kyrkösjärven tekoaltaan veden laatu on Seinäjokea tasaisempaa ja keskimäärin myös hieman parempaa. Lisäksi nykyisen raakavesipumppaamon heikon kunnon vuoksi vanhan pumppaamon saneerauksen ja uuden pumppaamon rakentamisen kustannusero arvioitiin nyt aiemmin oletettua pienemmäksi. Laitoksen oleva flotaatioselkeytys toimi koeajossa hyvin, kun saostuskemikaalina käytettiin PAX-XL60, annoksena joka oli raakaveden permanganaattiluvun (mg/l) suuruinen, ja flotaation pH:lla 5,8. Mixed bed-suodattimet toimivat laitosmittakaavan koeajossa koh-
tuullisen hyvin. Suodattimissa käsitellyn veden pH oli koeajoissa vähintään 7,5 ja alkali-
teetti vähintään 0,46 mmol/l, joten laitoksen kemiallisen jälkialkaloinnin korvaaminen
mixed bed-suodattimilla näytti olevan mahdollista. Laitoksella suositeltiin otettavaksi
käyttöön PAX-XL60 ja mixed bed-suodatus saneerauksen yhteydessä. Raakaveden hiili-
dioksidipitoisuutta on seurattava ja tarvittaessa lisättävä hiilidioksidia suodattimille me-
nevään veteen, jotta varmistetaan vapaasta hiilidioksidista riippuvaisen kalkkikivialka-
loinnin riittävä teho.

ABSTRACT

ILKKA KESKI-SAARI: Renovation of a surface water treatment plant – case study Jouppilanvuori plant
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 54 pages, 3 Appendix pages
January 2018
Master's Degree Programme in Civil Engineering
Major: Municipal Environmental Engineering
Examiner: Professor Jukka Rintala

Keywords: surface water, water treatment, limestone alkalization, coagulant chemicals, mixed bed filtration, flotation clarifier

This research was about comparing different methods of surface water treatment for potable water production. The focal points of the study were raw water supply, selection of best coagulant, and replacing chemical post-alkalization by limestone addition to the filter bed. The study was to verify some core base data to be used in the design of the renovation of Jouppilanvuori water treatment plant.

The purpose of potable water alkalization is to minimise water quality issues and extend pipe lifetime in water distribution networks by preventing corrosion. Limestone alkalization is a simple and safe way of alkalization, where need for maintenance is quite small. The weakness of the technology is the potential for microbiological problems caused by filter. The filter bed of mixed bed filtration consists of multiple filtration materials, for example sand and limestone.

Experimental part of study consists of three phases: coagulation experiments done in laboratory, pilot-tests focusing on flocculation and different filtration bed materials, and confirming the results by operating Jouppilanvuori water plant. Effectiveness of the water treatment process was measured by laboratory tests on samples taken from raw water, clarified water and filtered water. The results were evaluated by comparing to those of previous studies, and to national quality criteria and guidelines set for potable water.

Replacing the raw water intake was considered justified for better reliability and simplicity of operation due to more stable and slightly better quality of water of Kyrkösjärvi reservoir in comparison to present Seinäjoki river. Additionally, difference in implementation cost between renovation of old raw water intake and building a new one is smaller than anticipated because of the poor condition of the old intake. Flotation clarifiers of the Jouppilanvuori plant were running smoothly during the test runs, when PAX-XL60 was used as coagulant at a dosage as big as the permanganate index of raw water (mg/l) and pH 5.8 in the flotation. Mixed bed filter was working fairly well in the full-scale test runs. Filtered water had a pH of 7.5 and alkalinity no less than 0.46 mmol/l, so replacing chemical post-alkalization with mixed bed filters seems possible. Using PAX-XL60 and mixed bed filters after renovation of the water plant was recommended. The amount of carbon dioxide in raw water must be monitored and carbon dioxide added as necessary, to ensure effectiveness of limestone alkalization, which strongly depends on the amount of free carbon dioxide.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin osana Seinäjoen Energia Oy/Seinäjoen Veden Jouppilanvuoren pintavesilaitoksen saneeraussuunnittelua. Työn suunnittelu aloitettiin kesäkuussa 2016 ja siihen kuuluvat käsittelykokeet tehtiin Jouppilanvuoren laitoksella elo–joulukuussa 2016, minkä jälkeen raportti kirjoitettiin vuoden 2017 aikana täydentäen samalla saneeraussuunnitelmaa.

Haluan kiittää Seinäjoen Veden vesiliiketoiminnan johtaja Juha Santtilaa sekä vedentuo-
tannon käyttöpäällikkö Johanna Päckilää diplomityön tarjoamisesta sekä työn ohjauk-
sesta. Koulun puolelta haluan kiittää professori Jukka Rintalaa työn ohjaajana ja tarkas-
tajana toimimisesta. Kiitoksen ansaitsevat myös Lakeuden Vesi Oy:n työnjohtaja Martti
Peltola sekä vesilaitoksenhoitajat Kari, Jukka, Risto, Matti ja Jari, samoin kuin Jorma
Puska Ramboll Oy:stä, työn etenemisen aikana saadusta palautteesta ja teknisestä avusta.
Lappavesi Oy:tä haluan kiittää työssä käyttämäni koelaitoksen lainasta.

Lopuksi haluan kiittää vielä vanhempiani koko opiskelun ja erityisesti diplomityön teke-
misen aikana saamastani tuesta.

Tampereella, 24.1.2018

Ilkka Keski-Saari

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KALKKIKIVIALKALOINTI	3
2.1	Talousveden alkalointi	3
2.1.1	Korroosio	3
2.1.2	Alkaloinnin toteutus	5
2.2	Kalkkikivialkalointi	8
2.2.1	Kalkkikivi	8
2.2.2	Kalkkikiven ja hiilidioksidin reaktiotasapaino	9
2.2.3	Kalkkikivialkaloinnin soveltuvuus	10
2.2.4	Edut ja haitat	11
2.3	Kalkkikivisuodatus	12
2.3.1	Kalkkikivisuodattimen toteutus	12
2.3.2	Kalkkikivisuodattimen mitoitus	16
2.3.3	Kalkkikiven kuluminen	18
2.3.4	Mixed-bed-suodatin	19
3.	AINEISTO JA MENETELMÄT	20
3.1	Tutkimuksen koeajot	20
3.2	Jouppilanvuoren pintavesilaitos	21
3.2.1	Nykyinen laitos	21
3.2.2	Laitokselle suunniteltu saneeraus	23
3.3	Astiakokeet	25
3.4	Pilot-kokeet	27
3.4.1	Koelaitteisto	27
3.4.2	Kokeiden suoritus	28
3.5	Laitosmittakaavan koeajot	29
3.6	Analyysimenetelmät	31
4.	TULOKSET	33
4.1	Astiakokeet	33
4.1.1	Raakaveden laadun vaikutus puhdistustehoon	35
4.1.2	Saostuksen pH:n vaikutus puhdistustehoon	35
4.1.3	Kemikaaliannostuksen vaikutus puhdistustehoon	36
4.2	Pilot-kokeet	36
4.2.1	Selkeytetty vesi	36
4.2.2	Suodatettu vesi	37
4.3	Laitosmittakaavan koeajot	37
4.3.1	Selkeytetty vesi	38
4.3.2	Suodatettu vesi	39
5.	TULOSTEN TARKASTELU	40
5.1	Astiakokeet	41
5.2	Pilot-koeajot	42

5.3	Laitosmittakaavan koeajot.....	43
5.4	Jouppilanvuoren laitoksen saneeraus	46
5.4.1	Raakaveden hankinta	46
5.4.2	Esialkalointi ja saostus	47
5.4.3	Jälkialkalointi.....	49
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	50
	LÄHTEET.....	52

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α	Kalkkikiven huokoisuus
CO ₂	Alkaloinnissa neutraloidun hiilidioksidin määrä [mg/l]
F	Flotaatiosta lähtevä vesi
em.	Ei määritetty
KMnO ₄ -luku	Permanganaattiluku
LSI	Langlierin kyllästymisindeksi, joka kuvaa vedessä olevan kalsiumkarbonaatin saostumista ja veden kykyä liuottaa kalsiumkarbonaattia
LV	Lähtevä vesi
M	Moolimassa [g/mol]
m	massa [g]
n	Ainemäärä [mol]
pH _s	Kalkki-hiilidioksiditasapainolle ominainen pH
q _{mit}	Mitoitusvirtaama [m ³ /h]
RV	Raakavesi
t _{eff}	Veden tehollinen viipymä kalkkikivisuodattimessa [min]
V _{kalkkikivi}	Kalkkikiven irtotilavuus [m ³]

1. JOHDANTO

Vesihuolto on palvelu, joka toimittaa elämälle välttämättömän veden kuluttajien saataville. Veden merkityksen takia vesihuoltopalveluiden toimintavarmuus on elintärkeää yhteiskunnan toiminnalle. Suomessa käytetään vuorokaudessa vettä kotitalouksissa noin 129 litraa per asukas ja veden kokonaiskulutus, joka kuvaa kaikkea vesilaitosten verkostoihin syöttämää vettä, on noin 232 litraa asukasta kohden. (Vesilaitosyhdistys 2016)

Tulevaisuudessa kumuloituva saneeraustarve on ongelma vesihuollossa. Vesihuollon palvelutaso on toistaiseksi hyvä eikä pitkäkestoisia tai laaja-alaisia vesikatkoja ole, mutta nykyinen saneeraustahti ei riitä estämään tilanteen heikkenemistä vuosi vuodelta. (Rautiainen 2017) Ilman saneeraukseen tehtäviä lisäpanostuksia verkostojen kunto heikkenee ja vesihuollon palvelutaso laskee (Haapakoski 2014).

Tässä tutkimuksessa vertailtiin eri vaihtoehtoja humus-, rauta- ja alumiinipitoisen pintaveden puhdistamiseen talousvesikäyttöön. Tutkimus liittyi Seinäjoella sijaitsevan Joupilanvuoren vesilaitoksen saneeraussuunnitteluun ja keskittyi erityisesti kolmeen erityiskysymykseen: raakaveden hankintaan, käytettävien saostuskemikaalien valintaan sekä jälkialkaloinnin mahdolliseen korvaamiseen hiekkasuodattimille lisättävällä kalkkikivellä. Raakaveden osalta vertailtiin jokiveden ja jokeen rakennetun tekojärven veden ominaisuuksia raakavesilähteenä.

Teoriaosassa keskityttiin käsittelykokeiden taustaselvityksenä kalkkikiven käyttöön veden alkaloinnissa. Käsittelykokeissa vertailtiin eri saostuskemikaalien toimivuutta laboratorio- ja pilot-kokein, joissa kemikaalien lisäksi vertailtiin eri suodatinmassojen tehoa ja käytettävyyttä kohdeveden puhdistuksessa ja alkaloinnissa. Kalkkikivialkaloinnin toimivuuden varmistaminen kemiallisen jälkialkaloinnin korvaajana oli laitoksen saneeraussuunnittelun kannalta käsittelykokeiden tärkein yksittäinen tavoite. Kokeiden lopussa tehtiin laitosmittakaavan koeajoja Jouppilanvuoren laitoksella valittua saostuskemikaalia ja suodatinmassaa käyttäen. Käsittelykokeiden ja laitosmittakaavan koeajon aikana analysoitiin selkeytetyn ja suodatetun veden näytteitä ulkopuolisessa laboratoriossa. Tulosten tarkastelussa vertailtiin saatuja tuloksia aiempiin tutkimuksiin sekä talousvesiasetuksessa talousveden laadulle asetettuihin vaatimuksiin ja suosituksiin (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015).

Tulosten perusteella valittiin Jouppilanvuoren vesilaitoksella saneerauksen jälkeen käytettävät saostuskemikaalit ja jälkialkalointimenetelmä, sekä tarkasteltiin nykyisen jokivesiottamon saneerauksen ja uuden tekojärven rantaan tehtävän vedenottamon keskinäistä

edullisuutta. Vedenlaatu- ja käytettävyystekijöiden lisäksi huomioitiin saneerauksen arvioitua toteutuskustannukset eri vaihtoehdoilla.

Lähtötietoina käsittelykokeita suunniteltaessa käytettiin aiempia Jouppilanvuoren vesilaitoksen raakavedellä tehtyjä saostuskokeita (Ulvila 2008) sekä laitoksella vuonna 2011 suoritettuja koeajoja, joiden perusteella valittiin tutkittavat saostuskemikaalit. Kokeissa tutkittuja, useita eri suodatinmassoja sisältäviä mixed-bed-suodattimia osana vesilaitosten prosessia ovat aiemmin Suomessa tutkineet ainakin Zolas (2010) Helsingissä ja Iivari (2008) Oulussa. Sekä Helsingissä että Oulussa on myös otettu käyttöön suodattimia, joissa suodatinmassana on käytössä kalkkikiven ja hiekan sekoitus (Vuorilehto 2016, Otamo 2016).

2. KALKKIKIVIALKALOINTI

2.1 Talousveden alkalointi

2.1.1 Korroosio

Korroosiolla tarkoitetaan materiaalin syöymistä sen ympäristön olosuhteiden vaikutuksesta. Korroosiota esiintyy monissa eri materiaaleissa, kuten esimerkiksi metalleissa, muoveissa ja betonissa. Talousveden alkaloinnin tavoitteena on verkostossa esiintyvän korroosion ehkäiseminen. (Karttunen et al. 2003)

Talousveden laadulle asetettujen vaatimusten mukaan veden on siitä aiheutuvien terveys- haittojen ehkäisyyn tarkoitettujen laatuvaatimusten lisäksi oltava muutenkin käyttötarkoitukseen sopivaa, eikä se saa aiheuttaa haitallista syöpymistä tai haitallisia saostumia vesijohtoverkostoissa tai vedenkäyttölaitteissa (Vesi- ja Viemärilaitosyhdistys 2000). Putkiston korroosio saattaa heikentää veden laatua metalliputkien syöpyessä veteen liukenevan raudan ja kuparin vaikutuksesta sekä verkoston mikrobiologisen toiminnan lisääntyessä. Mahdollisten laatuhaittojen lisäksi korroosio lisää vesilaitoksen kustannuksia heikentämällä verkostossa käytettävien materiaalien kestävyttä lyhentämällä niiden käyttöikää sekä muodostamalla pumppauskustannuksia korottavia saostumia putkistoon. (Meriluoto 2002)

Verkostossa esiintyy kahta erilaista korroosiotyyppiä, yleistä ja paikallista korroosiota. Yleinen korroosio syövyttää putken pintaa kaikkialta samalla nopeudella, kun taas tietylle alueelle keskittyvä korroosio on paikallista korroosiota. Paikallisen korroosion havainnointi on korroosiotyypeistä vaikeampaa, koska se ei aiheuta veden metallipitoisuuksien kohoamista. Paikalliskorroosio saatetaankin havaita vasta putkeen tulleen reiän seurauksena. (Forsberg 2009)

Talousveden syövyttävyyteen vaikuttavat monet eri tekijät. Tärkeä syövyttävyyteen vaikuttava tekijä on veden laatu. Syövyttävyyteen vaikuttavia veden ominaisuuksia ovat:

- kovuus ja alkaliteetti
- veteen liuenneet kaasut ja suolat
- veden metallipitoisuus
- vedessä olevat rikkiyhdisteet
- vedessä oleva orgaaninen aines ja mikrobit
- lämpötila
- virtausnopeus

Veden laadun lisäksi syövyttävyyteen vaikuttaa veden kanssa kontaktiin joutuva materiaali. Edellä mainittujen tekijöiden vaikutus veden syövyttävyyteen vaihtelee riippuen materiaalista, jonka kanssa vesi on kosketuksessa. (Karttunen et al. 2003)

Osa syövyttävyyteen vaikuttavista laatutekijöistä riippuu toisistaan, minkä seurauksena esimerkiksi veden pH:n muuttuessa myös sen hiilidioksidipitoisuus muuttuu. Talousveden syövyttävyyttä arvioidessa ei voida keskittyä sen yksittäisiin ominaisuuksiin vaan kokonaisuuteen. Syövyttävyyteen vaikuttavien muuttujien suuren määrän ja reaktioiden monimutkaisuuden takia veden syövyttävyyden arviointi on haastavaa, eikä yleisesti kaikille materiaaleille pätevää laskennallista mallia ole pystytty kehittämään. (Forsberg 2009)

Veden syövyttävyyden riippuessa sen kanssa kosketuksissa olevasta materiaalista, ei alkalointia pystytä samanaikaisesti optimoimaan kaikille verkostomateriaaleille. Alkaloinnin tavoitteena onkin kompromissi, jolla verkoston korroosio on riittävän hidasta kaikilla verkoston materiaaleilla. Talousvedelle on eri maissa ja eri aikoina esitetty erilaisia laatusuosituksia korroosion välttämiseksi. Näitä laatusuosituksia on koottu taulukkoon 2.1. Vesi ei aina ole syövyttävää vaikka se ei täyttäisikään suosituksia, mutta tällaista vettä käytettäessä on usein tarpeen seurata verkoston korroosiota normaalia tarkemmin. (Meriluoto 2002)

Taulukko 2.1 Laatusuosituksia verkoston korroosion estämiseksi (koonnut Meriluoto 2002)

Muuttuja	Suomi (VVY 2000)	Suomi (Sitra 1980)	Ruotsi	Norja
pH	yli 7,5	yli 8,3	7,5–9,0	7,5–8,5
Alkaliteetti (mmol/l)	yli 0,6	yli 0,6	yli 1,0	0,6–1,0
Kalsium (mg/l)	yli 10	ei määritetty	20-60	15–25
Kloridit (mg/l)	ei määritetty	alle 50	alle 100	ei määritetty
Sulfaatit (mg/l)	ei määritetty	alle 100	alle 100	ei määritetty
KMnO ₄ -luku (mg/l)	ei määritetty	alle 20	alle 8,0	ei määritetty
Korroosioindeksi	yli 1,5	ei määritetty	ei määritetty	ei määritetty

Taulukossa mainittu korroosioindeksin arvo voidaan laskea kaavalla (1) (Meriluoto 2002):

$$Korroosioindeksi = \frac{\text{Alkaliteetti [mmol/l]}}{\frac{\text{Kloridi [mg/l]}}{35,5} + \frac{\text{Sulfaatti [mg/l]}}{48}} \quad (1)$$

Talousveden alkaloinnilla ehkäistään vesijohtoverkostoissa esiintyvää korroosiota muokkaamalla verkoston olosuhteita syövyttävien materiaalien passivoimiseksi, jolloin verkoston korroosio hidastuu. Verkoston olosuhteiden passivoidessa syövyttäviä materiaa-

leja putken pinnalle muodostuu korroosiotuotteista korroosion etenemistä hidastava kerros. Verkostoon menevän veden alkaloinnilla ei koskaan pystytä poistamaan sen syövyttävyyttä kokonaan. (Meriluoto 2002)

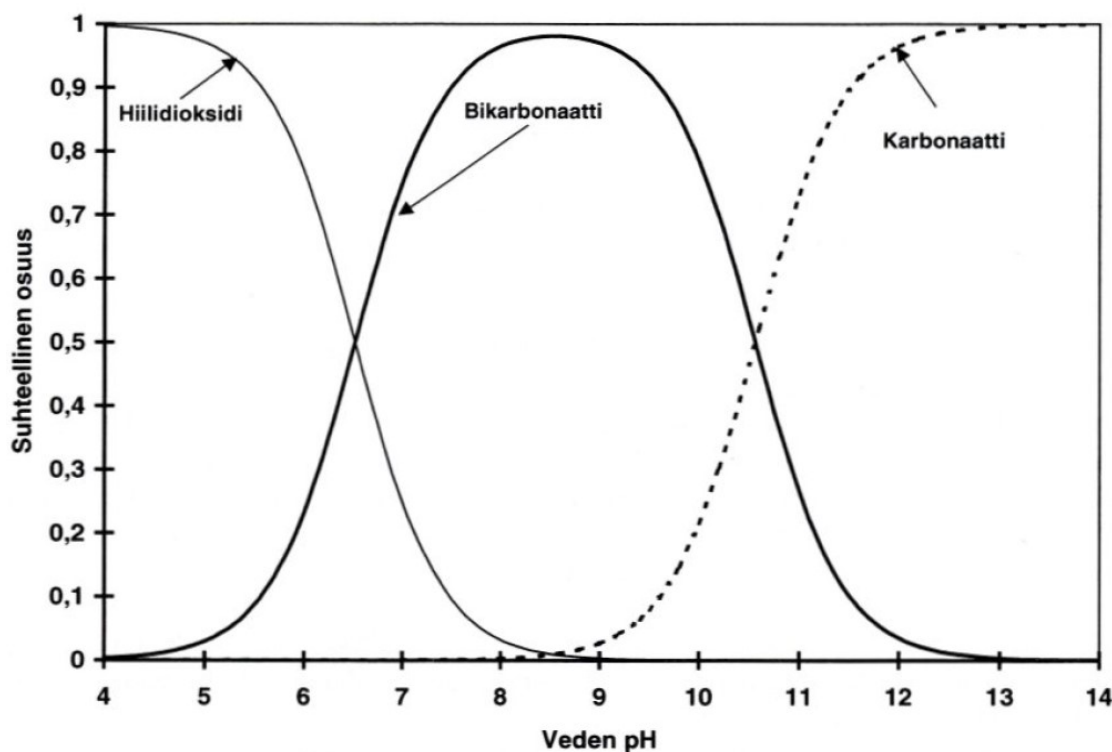
Suomessa talousvesinä käytettävien pinta- ja pohjavesien välillä on korroosion kannalta merkittäviä eroja. Pintavedet ovat pohjavesiä pehmeämpiä ja sisältävät usein suuria määriä humusta eli orgaanista ainesta. Niiden happamoitumisherkkyys ja alhainen pH estävät suojaavan kerroksen syntymisen metallin pinnalle lisäten metallien korroosioriskiä pintavettä käytettäessä. Pohjavedet ovat pintavesiä kovempia ja sisältävät vapaata hiilidioksidia, rautaa ja kloridia, minkä vuoksi ne ovat syövyttäviä. (Karttunen et al. 2003)

Sopivaa alkalointimenetelmää käyttämällä pystytään ehkäisemään suurin osa korroosion ja näin minimoimaan korroosion aiheuttamat ongelmat. Alkalointi parantaa veden teknisiä ominaisuuksia minimoiden korroosion aiheuttamat kustannukset ja pienentää korroosion aiheuttamia terveysriskejä. (Kuurikoski & Palomäki 2001)

2.1.2 Alkaloinnin toteutus

Vesi on aggressiivista, eli putkia nopeasti syövyttävää, mikäli sen pH on alhainen ja siinä on paljon vapaata hiilidioksidia. Suomessa vesilaitosten raakavetenä käyttämä vesi on yleensä aggressiivista sen pehmeuden ja korkean hiilidioksidipitoisuuden takia. Aggressiivisuuden poistaminen vaatii ylimääräisen hiilidioksidin poistoa tai sen sitomista toiseen muotoon. Muita aggressiivisuuden poistosta käytettyjä nimityksiä ovat neutralointi ja alkalointi, jolla tarkoitetaan tarkoituksellista veden alkaliteetin nostamista. (Karttunen et al. 2004) Alkaliteetti on veden ominaisuus, joka kuvaa sen kykyä neutraloida happoja ja vastustaa näin pH:n muutoksia. Alkaliteetti määritetään mittaamalla vettä titratessa kuluvia happomääriä. Suomessa sekä pinta- että pohjavesien alkaliteetti on yleensä alhainen. Alhainen alkaliteetti nopeuttaa verkoston korroosiota, joten yleensä vesilaitoksilla nostetaan veden alkaliteettiä vesijohtoverkoston ja erityisesti siihen kuuluvien metallisten osien syöpymisen ehkäisemiseksi. Veden alkaliteetti aiheutuu sen hydroksidi-, bikarbonaatti- sekä karbonaattipitoisuuksista. (Karttunen et al. 2003)

Käytännössä kaikki vesi sisältää jonkin verran hiilidioksidia (Karttunen 2003). Vedessä olevan hiilidioksidin määrä ja sen esiintymismuodot ovat veden aggressiivisuuden kannalta ratkaiseva tekijä. Vapaan hiilidioksidin lisäksi vedessä voi olla hiilidioksidia joko bikarbonaattiin tai karbonaattiin sitoutuneena. Veden hiilidioksidin eri esiintymismuotojen suhteelliset osuudet määräytyvät veden pH:n mukaan kuvassa 2.1. esitetyllä tavalla. (Meriluoto 2002)



Kuva 2.1 Veden sisältämän hiilidioksidin esiintymismuodot eri pH-olosuhteissa (Meriluoto 2002)

Kuten kuvasta 2.1 voidaan todeta, on vedessä oleva hiilidioksidi pääosin joko vapaana hiilidioksidina tai bikarbonaattiin sitoutuneena veden pH:n ollessa normaalilla talousveden pH-alueella. Hydroksidi-ionien puuttuessa ja bikarbonaatin ollessa vallitseva karbonaattimuoto on talousveden alkaliteetti käytännössä seurausta sen bikarbonaattipitoisuudesta.

Alkalointi voidaan toteuttaa joko lisäämällä veteen alkalointikemikaalia tai alentamalla veden hiilidioksidipitoisuutta ilmastuksen avulla. Alkaloinnissa käytettävät kemikaalit ovat emäksiä, jotka sitovat vedessä olevaa hiilidioksidia bikarbonaatiksi nostaen veden pH:ta. Tyypillisiä vesilaitoksilla käytettyjä alkalointikemikaaleja ovat:

- sammutettu kalkki eli kalsiumhydroksidi
- poltetu kalkki eli kalsiumoksidi
- kalkkikivi eli kalsiumkarbonaatti
- sooda eli natriumkarbonaatti
- lipeä eli natriumhydroksidi

Ilmastuksen avulla tapahtuvassa alkaloinnissa veden hiilidioksidipitoisuus alenee siihen liuenneen hiilidioksidin siirtyessä ilmaan. (Meriluoto 2002)

Hiilidioksidia neutraloivat reaktiot ovat erilaisia eri alkalointikemikaaleja käytettäessä. Eri alkalointikemikaaleilla tapahtuvien hiilidioksidia neutraloivien reaktioiden reaktioyhtälöt on koottu taulukkoon 2.2 (Karttunen et al. 2004). Sammutettu ja poltettu kalkki on yhdistetty taulukossa, koska reaktiot ovat niillä samat.

Taulukko 2.2 Vedessä tapahtuvat hiilidioksidin neutraloinnin reaktiot eri alkalointikemikaaleilla (Karttunen et al. 2004)

Alkalointikemikaali	Vedessä tapahtuva reaktio
Kalkki	$\text{Ca(OH)}_2 + 2 \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$
Kalkkikivi	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$
Sooda	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Na}^+ + 2 \text{HCO}_3^-$
Lipeä	$\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^-$

Reaktioyhtälöistä nähdään, että kalkkikiveä ja sammutettua tai poltettua kalkkia käyttäessä myös veden kovuus nousee kalkkipohjaisten alkalointikemikaalien reagoitessa vedessä olevan hiilidioksidin kanssa. Reaktion tuloksena syntyy kalsiumia, ja veden kalsiumpitoisuuden nousun seurauksena myös sen kovuus kasvaa.

Kalkkipohjaisten alkalointikemikaalien käytöstä seuraavan kovuuden nousun lisäksi kaikkien alkalointikemikaalien käyttö nostaa veden alkaliteettia. Taulukkoon 2.3 on kerätty yhteenveto eri alkalointikemikaalien käytön vaikutuksista veden kalsiumpitoisuuden sekä alkaliteettiin. Kalsiumpitoisuuden ja alkaliteetin nousu voidaan laskea teoreettisesti suhteessa neutraloidun hiilidioksidin määrään käyttämällä edellä esitettyjä reaktioyhtälöitä ja reaktioyhtälöissä esiintyvien yhdisteiden moolimassoja. (Meriluoto 2002)

Taulukko 2.3 Veden kalsiumpitoisuuden ja alkaliteetin muuttuminen alkaloinnin seurauksena (Meriluoto 2002)

Alkalointikemikaali	Kalsiumpitoisuuden nousu (mmol/l)	Alkaliteetin nousu (mmol/l)
Kalkki	CO_2 [mg/l] / 88	CO_2 [mg/l] / 44
Kalkkikivi	CO_2 [mg/l] / 44	CO_2 [mg/l] / 22
Sooda	0	CO_2 [mg/l] / 22
Lipeä	0	CO_2 [mg/l] / 44 ¹

Taulukosta nähdään, että ainoastaan kalkkipohjaisten alkalointikemikaalien käyttö nostaa käsiteltävän veden kovuutta. Veden kovuus aiheutuu pääosin sen sisältämästä magnesiumista ja kalsiumista. Reaktioyhtälöiden perusteella veden magnesiumpitoisuus ei muutu alkaloinnissa, joten käsiteltävän veden kovuus kasvaa alkaloinnin aikana yhtä paljon kuin sen kalsiumpitoisuus.

¹ CO_2 [mg/l] tarkoittaa alkaloinnissa neutraloidun hiilidioksidin määrää

2.2 Kalkkikivialkalointi

2.2.1 Kalkkikivi

Kalkkikivi on yleisnimitys maaperässä runsaasti esiintyville karbonaattikiville. Kalkkikivi on yksi tärkeimmistä kaupallisista sedimenttikivilajeista. (Boynton R.S. 1980) Kaikista kalkkikivistä vähintään 50 % painosta on kalsiumkarbonaattia kalsiitti-mineraalina (Geology.com).

Kalkkikivi on luonnollinen raaka-aine, jota käytetään moniin erilaisiin tarkoituksiin niin paperi-, teräs- ja rakennusteollisuudessa kuin ympäristönhoidon- ja maatalouden käyttöönkin. Eri paikoista louhitun kalkkikiven ominaisuudet eroavat yleensä toisistaan, joten eri louhoksilta saadaan kiveä eri käyttötarkoituksiin. (GeoFoorumi 2010)

Kaikki kalkkituotteet ovat peräisin eri puolella maailmaa esiintyvistä, kalsium- ja magnesiumkarbonaattia sisältävistä kalkki- ja dolomiittikivistä. Karbonaattikivilajien luokitus (taulukko 2.4) määräytyy niiden magnesiumpitoisuuden (määritetään yleensä magnesiumoksidina) perusteella. Suomessa sijaitsee muutama hyödynnettävissä oleva kalkkiviesiintymä, vaikka kokonaisuutena kalkki- ja dolomiittikiven määrä Skandinavian peruskalliossa on rajallinen. (Meriluoto 2002)

Taulukko 2.4 Karbonaattikivilajien luokitus (Meriluoto 2002)

Karbonaattikivilaji	Magnesiumoksidipitoisuus (%)
Kalkkikivi (kalsiumkarbonaatti)	< 2
Dolomiittinen kalkkikivi	2–9
Dolomiitti	> 9

Kalkkikivi syntyy merivedessä tapahtuvan eloperäisen aineksen saostuessa. Pohjaan vajonnut eloperäinen aines muodostaa ajan mittaan kalkkikiveksi kovettuvia kalkkilietekerroksia. Kalkkikiven sisältämät fossiilit aiheutuvat kerroksiin kulkeutuvista koralleista, simpukoista ja kotiloista. Ajan kuluessa tapahtuneen mannerlaattojen liikkeen ja vuoris-
tojen poimuttumisen takia kalkkikivimuodostumia voi löytyä sisämaasta, hyvinkin kaukana nykyisestä rannikosta. (Oy Erikstone Ab)

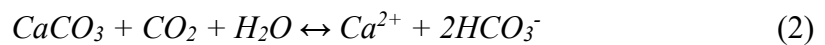
Kalkki- ja dolomiittikiveä tuottavat geologiset prosessit kestävät satoja miljoonia vuosia. Kalkkikiven ikä voi vaihdella Suomen esiintymien 1–2 miljardin vuoden ikäisistä kalkkikivistä aina Ruotsissa löydettyihin noin 100 miljoonan vuoden ikäisiin kalkkikiviin. Erilaisen muodostumistavan ja -olosuhteiden takia kalkkikiven kemiallinen koostumus ja sen ominaisuudet, esimerkiksi hiilidioksidin ja kalkkikiven välisen reaktion nopeuteen vaikuttava liukoisuus, vaihtelevat. (Meriluoto 2002)

Alkaloinnissa käytetään yleensä kalkkikiveä, jonka kalsiumkarbonaattipitoisuus on yli 92 % ja raskasmetallipitoisuudet hyvin alhaiset. Dolomiitin käyttö on herättänyt kiinnostusta

sen nostaessa veden kalsiumpitoisuutta kalkkikiveä vähemmän, mikä vähentää kalkkikivisaostumien muodostumista lämminvesilaitteissa. Dolomiitin heikkoudeksi on havaittu sen kalkkikiveä hitaammat reaktiot hiilidioksidin kanssa, minkä vuoksi alkaloivaa suodatinmassaa käytettäessä dolomiittisuodatin vaatii kalkkikivisuodatinta selvästi suuremman tilavuuden. Myynnissä on myös dolomiitista lämpökäsittelyllä valmistettavia puolipoltettuja alkaloitintainmassoja, jotka käyttäytyvät eri tavalla kuin luonnosta löytyvä dolomiitti tai kalkkikivi. (Meriluoto 2002)

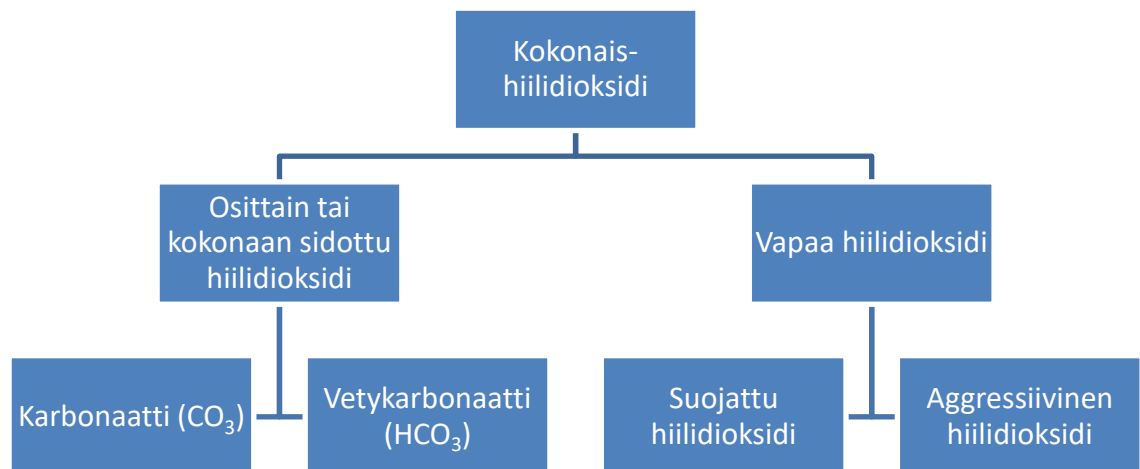
2.2.2 Kalkkikiven ja hiilidioksidin reaktiotasapaino

Alkaloinnissa käytettävän kalkkikiven (kalsiumkarbonaatin) ja veden sisältämän hiilidioksidin välinen reaktio on:



Kalsiumkarbonaattia liukenee veteen reaktion edetessä vasemmalta oikealle ja saostuu reaktion edetessä oikealta vasemmalle. Veden hiilidioksidipitoisuus kasvaa kalsiumkarbonaatin liuetessa ja pienenee sen saostuessa. Veden kalsium- ja vetykarbonaattipitoisuudet kasvavat kalsiumkarbonaatin liuetessa ja pienenevät sen saostuessa. Saostumis- ja liukenemisnopeuksien ollessa yhtä nopeita vesi on kalkki-hiilidioksiditasapainossa. (Meriluoto 2002)

Veden sisältämä hiilidioksidi jakautuu eri muotoihin (kuva 2.2). Kuvassa esiintyvistä suojatusta hiilidioksidista käytetään myös nimitystä kalkki-hiilidioksiditasapainoon kuuluva hiilidioksidi (Meriluoto 2002). Vesi on sitä aggressiivisempaa mitä enemmän siinä on hiilidioksidia suhteessa vetykarbonaatteihin. Suomessa sekä pinta- että pohjavedet ovat yleensä aggressiivisiä, koska niiden vetykarbonaattipitoisuudet ovat alhaisia. (Karttunen et al. 2003)



Kuva 2.2 Vedessä olevan hiilidioksidin jakautuminen (Karttunen et al. 2003)

Kalkki-hiilidioksiditasapainossa oleva vesi ei sisällä veden karbonaatteja vetykarbonaateiksi liuottavaa aggressiivista hiilidioksidia, joten se ei syövytä karbonaatteja. Kalkki-hiilidioksiditasapainossa oleva vesi ei myöskään aiheuta saostumista. Kalkki-hiilidioksiditasapainossa olevan veden vetykarbonaatti- ja hiilidioksidipitoisuudet riippuvat molekyylien hajoamiseen vaikuttavista veden lämpötilasta ja pH:sta. (Karttunen et al. 2003)

Kalkki-hiilidioksiditasapainon ansiosta kalkkikivialkalointi on useimpia alkalointimenetelmiä turvallisempaa. Kalsiumkarbonaatin ja veden hiilidioksidin välinen reaktio (2) etenee vain, kunnes reaktiotasapaino on saavutettu. Tämän jälkeen reaktio pysähtyy ja veden pH jää kalkki-hiilidioksiditasapainolle ominaiseen arvoon (pH_s). Tislattua vettä kalsiumkarbonaatilla alkaloimalla pystytään määrittämään pH_s :n teoreettinen yläraja, joka on 25 °C:n lämpötilassa noin 10. Luonnonvesissä on aina hiilidioksidia sekä liukenemista puskuvoivaa kalsiumia ja alkaliteettia, joten niiden pH jää aina alemmaksi eikä ylialkaloitumisen vaaraa ole. Laskennallisesti pH_s voidaan laskea likimain kaavan (3) avulla.

$$pH_s = 2,34 + \log_{10}[Ca^{2+}] + \log_{10}[HCO_3^-], \quad (3)$$

missä pH_s on kalkki-hiilidioksiditasapainon mukainen pH ja $[Ca^{2+}]$ sekä $[HCO_3^-]$ veden kalsium- ja bikarbonaattipitoisuudet mooleina litrassa. (Meriluoto 2002)

Teoreettisesti vedessä olevan kalsiumkarbonaatin saostumista ja veden kykyä liuottaa kalsiumkarbonaattia (kalkkikiveä) kuvataan Langlierin kyllästymisindeksiä (LSI) käyttämällä. LSI voidaan määrittää kaavalla (4)

$$LSI = pH - pH_s, \quad (4)$$

missä pH on vedestä mitattu pH ja pH_s kalkki-hiilidioksiditasapainon mukainen pH. Mikäli LSI:n arvo on positiivinen, on kalsiumkarbonaatin saostuminen mahdollista ja negatiivinen LSI tarkoittaa veden olevan aggressiivista eli kalsiumkarbonaattia syövyttävää. Saostumiseen vaikuttaa kaavassa (3) esiintyvien pitoisuuksien lisäksi veden lämpötila kalsiumkarbonaatin liuetessa paremmin kylmään kuin lämpimään veteen. Riittävästi alkaloidusta vedestä pitäisi saostua lämmitettäessä kalkkikiveä, joten lämminvesilaitteiden kalkkikivisaostumat ovat veden alkaloinnin väistämätön seuraus. (Meriluoto 2002)

2.2.3 Kalkkikivialkaloinnin soveltuvuus

Kalkkikiveä on käytetty talousveden alkalointiin laitosmittakaavassa jo pitkään. Aiemmin arvioitiin, että hiilidioksidin ja kalkkikiven välisten reaktioiden hitaus heikentää menetelmän tehokkuutta, mutta korroosion estämiselle esitettyjen laatusuositusten pH-muutos 8,3:sta 7,5:en pienensi reaktion hitaudesta aiheutuvaa haittaa. (Laakso 1997).

Kalkkikivi toimii alkaloinnissa parhaiten käsiteltävän veden ollessa pehmeää (alkaliteetti $\leq 0,8$ mmol/l) ja sisältäessä 10–15 mg/l hiilidioksidia. Tällaista vettä käsiteltäessä kalkki-

kiven ja veden reaktio tapahtuu kohtuullisen nopeasti, minkä seurauksena vaadittu kontaktiaika ei ole epäkäytännöllisen pitkä. Hiilidioksidipitoisuuden ollessa liian korkea (>15 mg/l) voidaan vettä ilmastaa ennen alkalointia, jolloin sen hiilidioksidipitoisuus saadaan laskemaan. Alkaliteetin ollessa yli $0,8$ mmol/l kalkkikiven teho heikkenee, eikä sitä käytännössä kannata käyttää alkaliteetin ylittäessä $1,5$ mmol/l. (Meriluoto 2002)

Käsiteltävän veden ollessa erittäin pehmeää (alkaliteetti $<0,3$ mmol/l) ja sen hiilidioksidipitoisuuden ollessa hyvin pieni (<5 mg/l), voi kalkkikivellä alkaloidun veden pH:n kohota normaalia korkeammalle. Tällaisessa tilanteessa alkaloidun veden pH voi olla $9,0$ tai jopa hieman korkeampi. Kalkkikivialkaloinnilla käsitellyn veden pH pysyy kuitenkin taseisena, kun taas erittäin pehmeän ja vähän hiilidioksidia sisältävän veden käsittely muilla alkalointimenetelmillä aiheuttaa usein suuria pH-vaihteluita. Mikäli kalkkikivialkaloidun veden korkeasta pH:sta on haittaa, voidaan käsittelyn tehoa laskea. Käsittelyn tehon lasku onnistuu pienentämällä tehollista viipymää joko kalkkikivipatjan kokoa pienentämällä tai kalkkikiven raekokoa suurentamalla, lisäämällä hiilidioksidia veteen ennen käsittelyä tai käsittelemällä vain osa alkaloitavasta vedestä ja johtamalla loppu vesi alkaloinnin ohi. (Meriluoto 2002)

2.2.4 Edut ja haitat

Kalkkikiven käyttö veden laadun parantamiseen alkoi Suomessa 1980-luvulla. Menetelmän suosio veden alkaloinnissa on kasvanut voimakkaasti 2000-luvulla. Suurimmat hyödyt kalkkikivialkaloinnista verrattuna muihin alkalointimenetelmiin ovat turvallisuus, helppokäyttöisyys, vähäinen huoltotoimenpiteiden tarve sekä käsitellyn veden pH:n taseisuus (Korkka-Niemi et al. 2012)

Kalkkikiven turvallisuus on edellä esitetyn kalkki-hiilidioksiditasapainon ansiota. Reaktio etenee vain tasapainotilaan asti, eikä ylialkaloitumisen vaaraa ole. Kalkkikivialkalointi toteutetaan suodattimille laitettavan kalkkikiven avulla, joten alkalointiin ei tarvita huoltoa vaativia kemikaalipumppuja ja prosessi on muutenkin yksinkertainen. (Laakso 1997)

Kalkkikivialkaloinnin heikkouksia ovat mahdolliset kalkkikivisuodattimesta aiheutuvat käsitellyn veden mikrobiologiset laatuongelmat, joita on kalkkikiveä käytettäessä. Mikrobiologisten laatuongelmien ehkäisemiseksi valon pääsy kalkkikivisuodattimille on syytä estää ja vieraiden aineiden kulkeutumista suodattimille on valvottava kalkkikiven kuljettamisen aikana. (Laakso 1997)

2.3 Kalkkikivisuodatus

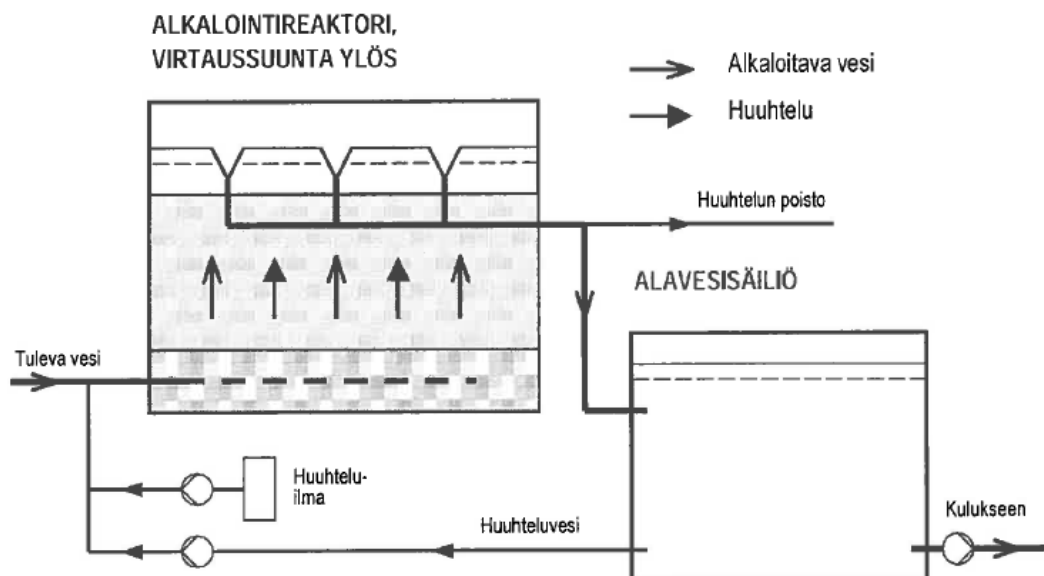
2.3.1 Kalkkikivisuodattimen toteutus

Kalkkikivisuodattimen toteutukseen on useita teknisiä vaihtoehtoja, joissa suodattimessa käsiteltävän veden virtaussuunta vaihtelee. Virtaus voi tapahtua alhaalta ylöspäin (käänteinen suodatin), ylhäältä alaspäin (perinteinen suodatin) tai vaakasuoraan suodattimen läpi (vaakavirtaussuodatin). Yleisimmässä tapauksessa virtaus etenee suodattimessa alhaalta ylös. Tällaisia suodattimia on hieman yli puolet kaikista kalkkikivisuodattimista Suomessa, noin neljännes suodattimista on perinteistä suodatintyyppiä ja noin 5 % on vaakavirtaussuodattimia. 15 % suodattimista virtaussuuntaa voidaan vaihdella. (Meriluoto 2002)

Rakennettavan suodattimen teknisestä toteutuksesta riippumatta sille on rakennettaessa suositeltavaa suunnitella joko pelkällä ilmalla tai ilman ja veden yhdistelmällä toimiva huuhtelu suodattimeen kertyvien epäpuhtauksien poistamiseksi. Huuhtelu vaatii oman pumpun ja putkiston sekä ilmaa käytettäessä myös paineilmakompressorin. Lisäksi huuhteluvesien käsittely on ratkaistava. (Meriluoto 2002)

Kalkkikivisuodatusta alkaloinnissa käyttävän vesilaitoksen raakaveden ollessa hyvää ei kalkkikivisuodattimeen muodostuva sakka yleensä heikennä suodattimen alkalointitehoa. Hietalan (2000) tutkimuksessa kartoitettiin kymmenen vesilaitosta, joista yhdessä sopivaksi huuhteluväliksi oli todettu kuukausi muiden laitosten huuhteluvälin ollessa vähintään useita vuosia. Tutkittujen laitosten raakaveden rautapitoisuus oli kuitenkin alhainen, mikä yleensä vähentää kalkkikivisuodattimen huuhtelutarvetta.

Käänteiseen suodattimeen (kuva 2.3) tuleva vesi ei pääse ilmastumaan ennen kontaktia suodattimella olevan kalkkikiven kanssa. Tällöin veden sisältämät hapettuvat epäpuhtaudet eivät saostu suodattimeen, mikä vähentää suodattimen huuhtelutarvetta. Laitosten raakavesissä olevia hapettuvia epäpuhtauksia ovat esimerkiksi rauta ja mangaani. Toisaalta vedessä oleva hiilidioksidi ei pääse ilmaan, vaan se on käytettävä kokonaisuudessaan reaktioihin kalkkikiven kanssa. (Kuorikoski & Palomäki 2001)



Kuva 2.3 Käänteinen suodatin (Meriluoto 2002)

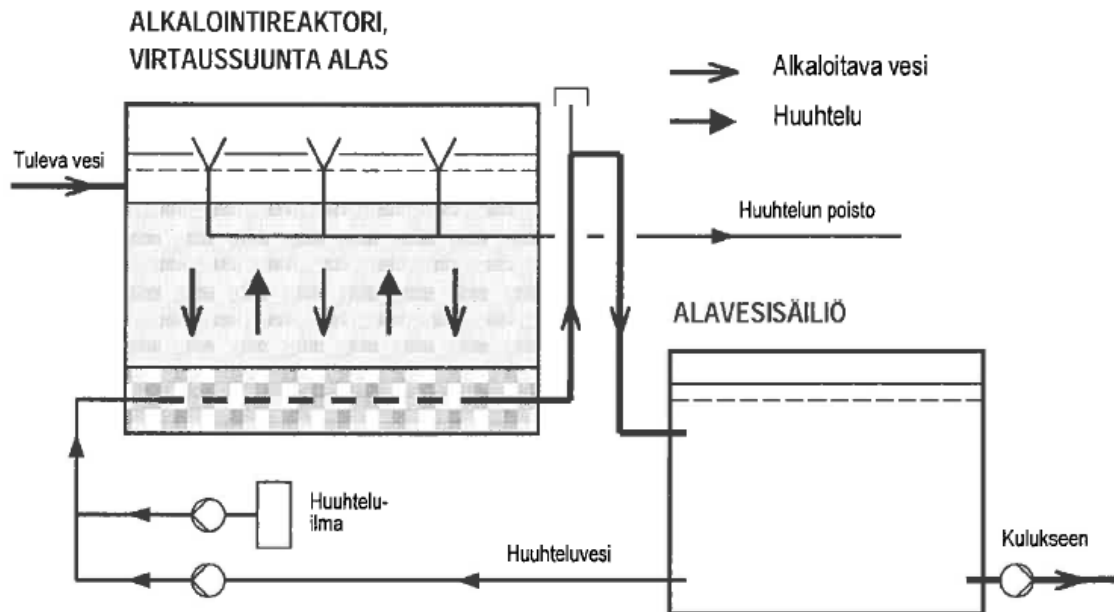
Käänteistä suodatinta on järkevää käyttää ainoastaan käsiteltävän veden hiilidioksidipitoisuuden ollessa riittävän alhainen, koska kalkkikivisuodattimen ollessa hiilidioksidia poistavaa ilmastusta seuraava prosessivaihe tarvitaan useampi pumppaus, mikä nostaa kustannuksia. Käsiteltävän veden liian alhainen hiilidioksidipitoisuus ei estä käänteisen suodattimen käyttöä, koska veteen on mahdollista syöttää hiilidioksidia ennen suodatinta. (Kuorikoski & Palomäki 2001)

Käänteistä suodatinta käytettäessä on suodattimen käyttöönoton jälkeen tarpeen määrittää suodattimille sopiva huuhteluväli säännöllisiä huuhteluja tekemällä. Suodattimelle kertyvät saostumat jäävät kalkkikivipatjan alareunaan ja patjan yläreuna säilyy valkoisena, jolloin saostumia ei havaita ennen suodatinvastuksen merkittävää kasvua tai mahdollisesti vasta saostumien läpäistessä patjan. Käänteisen suodattimen käytössä saostumista voi tapahtua, kun laitokselle käyttämästä raakavedestä osa on hapellista ja osa hapetonta, jolloin hapettoman veden epäpuhtaudet pääsevät hapettumaan ennen suodatinta. (Kuorikoski & Palomäki 2001)

Perinteistä suodatintyyppiä (kuva 2.4) käytettäessä käsiteltävän veden epäpuhtaudet hapettuvat suurilta osin suodattimeen, minkä ansiosta erilliset raudan- ja mangaaninpoistoon tarvittavat prosessivaiheet voidaan joskus korvata tällaisen kalkkikivisuodattimen avulla. Suodattimeen saostuu enemmän epäpuhtauksia kuin käänteistä suodatinta käytettäessä, joten suodatin vaatii enemmän huuhtelua. Huuhtelutarve on kuitenkin helppo havaita saostumien ollessa pääasiassa kalkkikivipatjan pintakerroksessa. (Kuorikoski & Palomäki 2001)

Perinteistä suodatintyyppiä olevan kalkkikivisuodattimen käytön soveltuvuus raudan- ja mangaaninpoistoyksikön korvaajaksi riippuu laitoksen muista prosessiyksiköistä. Iivarin

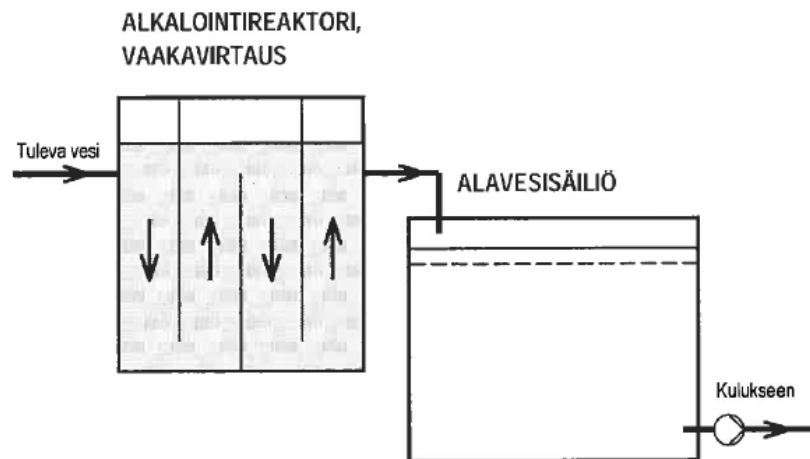
(2008) tutkimuksessa kokeiltiin raudanpoistoon käytetyn hiekkasuodattimen korvaamista perinteistä suodatintyyppiä olevalla kalkkikivisuodattimella. Kalkkikivisuodatin (rautajäännös 0,06 mg/l) poisti rautaa lähes yhtä hyvin kuin hiekkasuodatin (rautajäännös 0,04 mg/l), mutta samalla suodattimien huuhteluun kuluvan veden määrä kasvoi 30 %. Lisäksi suodattimen nostaessa veden pH:ta suodattimen jälkeen prosessissa olevien aktiivihiili-suodatuksen ja otsonoinnin teho laski. Kaikkiaan laitoksen käyttökustannusten arvioitiin nousevan yli 10000 euroa vuodessa, joten kalkkikivisuodattimen käyttö ei ollut järkevää.



Kuva 2.4 Perinteinen suodatintyyppi (Meriluoto 2002)

Perinteisen suodatintyyppin käyttö mahdollistaa käsiteltävän veden hiilidioksidipitoisuuden laskemisen ennen suodatinta olevalla ilmastuksella. Veteen on myös mahdollista lisätä hiilidioksidia ennen suodatinta. Alkalointituloksen optimointi vaatii hiilidioksidipitoisuuden laskemista selvästi sen nostoa useammin raakavesien sisältäessä useimmiten joko riittävästi tai liikaa hiilidioksidia. (Kuorikoski & Palomäki 2001)

Vaakavirtausuodattinten käytön rajoituksena on oikovirtauksista aiheutuva suodatintilavuuden epätasainen käyttö, jota voidaan yrittää hallita rakentamalla suodattimeen väliseiniä. Suodatintilavuuden epätasaisen käytön seurauksena suodattimessa oleva kalkkikivi kuluu nopeammin suodattimelle tulevan veden puoleisissa päädyissä. Suodattimelle tulevan veden ilmastusta on vaikea järjestää taloudellisesti kannattavasti sen vaatiessa yleensä useita pumppauksia, joten käsiteltävän veden hiilidioksidipitoisuus ei saa olla liian korkea. Suodattimelle tulevan veden ei pitäisi ilmastua, joten saostumia pitäisi syntyä vain vähän. (Kuorikoski & Palomäki 2001)



Kuva 2.5 Vaakavirtaussuodatin (Meriluoto 2002)

Taulukkoon 2.5 on kerätty yhteenveto yleensä käytettävien suodatintyyppien hyvistä ja huonoista puolista.

Taulukko 2.5 Suodatintyyppien edut ja heikkoudet (Meriluoto 2002)

Suodatin- tyyppi	Edut	Heikkoudet
Käänteinen	<ul style="list-style-type: none"> - Vesi ei ilmastu ennen suodattainta, joten hiilidioksidista saadaan täysi hyöty - Oikovirtausten riski pieni - Huuhtelulaitteistojen asennus helppoa - Poistuva vesi näkyvässä, joten epäpuhtauksien karkaaminen helppo havaita 	<ul style="list-style-type: none"> - Mangaanin ja raudan hapettuessa niiden saostuminen suodattimeen vaikea havaita
Perinteinen	<ul style="list-style-type: none"> - Ilmastus helppo järjestää ennen suodatusta - Huuhtelutarve selvästi havaittavissa - Huuhtelulaitteistojen asennus helppoa - Oikovirtausten riski pieni 	<ul style="list-style-type: none"> - Pohjaputkistoihin saattaa kulkeutua hienojakoista kalkkikiveä ja sakkaa

Kalkkivisuodattimien toteuttamisessa on otettava huomioon niistä mahdollisesti aiheutuvat mikrobiologiset laatuongelmat vedessä. Muutamissa tapauksissa suodattimeen on päätyntä veden bakteeripitoisuuksia lisääviä epäpuhtauksia, jolloin suodattimen desinfiointi on tarpeen. (Laakso 1997)

Havaittujen laatuongelmien lisäksi kalkkivisuodattimen desinfiointi kannattaa yleensä tehdä aina kalkkikiven lisäämisen jälkeen ennen suodattimen käyttöönottoa (Meriluoto 2002). Tällaisessa tilanteessa paras tapa suodattimen desinfiointiin on suodatinmassan

kuumentaminen 100 °C:een, mikä asettaa vaatimuksia rakentamisessa käytettäville materiaaleille (Laakso 1997). Toinen vaihtoehto suodattimen desinfiointiin on kemiallinen klooraus (Meriluoto 2002)

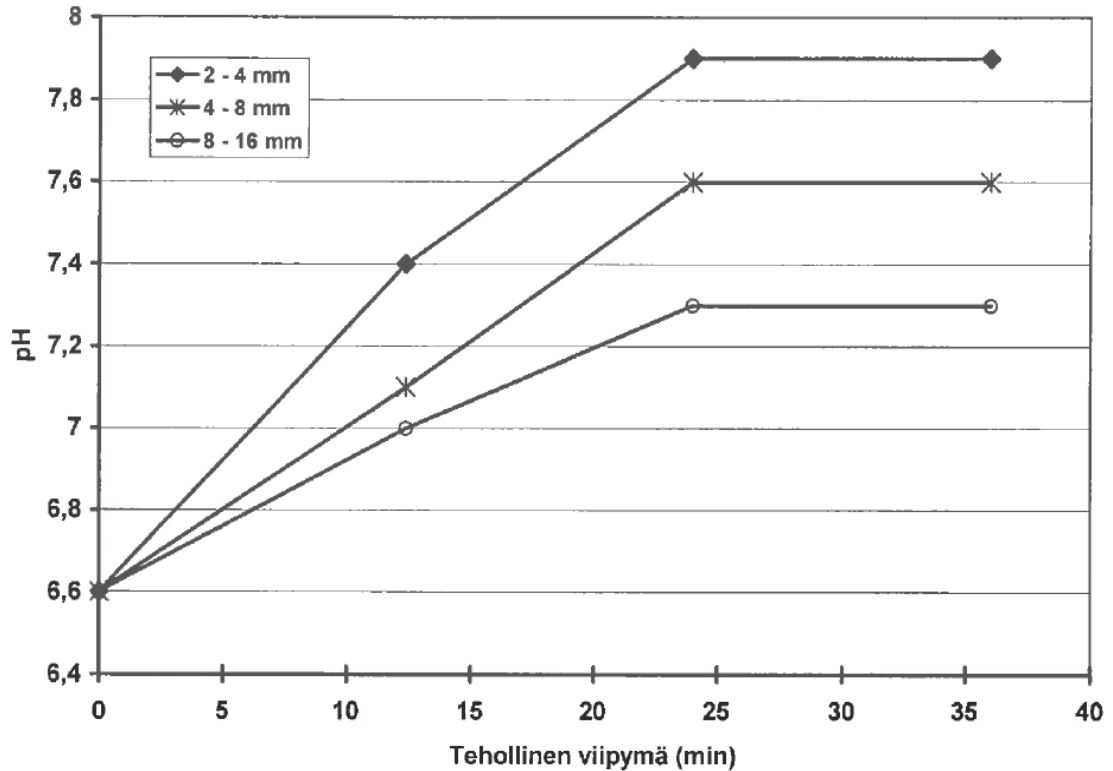
2.3.2 Kalkkikivisuodattimen mitoitus

Kalkkikivisuodattimen mitoitus perustuu alkaloitavan veden teholliseen viipymään suodattimessa eli aikaan, jonka käsiteltävä vesi ja suodatinpatjan kalkkikivi ovat kosketuksessa. Vaadittu tehollinen viipymä määräytyy alkaloitavan veden laadulle vaaditun muutoksen mukaan niin, että viipymän on oltava riittävä halutun laatumuutoksen aikaansaamiseksi. Suodattimeen vaadittuun teholliseen viipymään vaikuttavia muuttujia ovat käsiteltävän veden alkaliteetti ja hiilidioksidipitoisuus, suodattimen mitoitusvirtaama sekä kalkkikiven laatu ja raekoko. Taulukkoon 2.6 on koottu esimerkkejä kokeissa havaituista teholliselle viipymälle vaadituista arvoista vaihtelevilla raakavesillä ja kalkkikiven raekoolla. (Meriluoto 2002)

Taulukko 2.6 Esimerkkejä tehollisista viipymistä (Meriluoto 2002)

Raakavesi	Raekoko 2-4 mm	Raekoko 4-8 mm
Hiilidioksidi alle 5 mg/l Alkaliteetti alle 0,3 mmol/l	15-20 min	20-25 min
Hiilidioksidi 10-15 mg/l Alkaliteetti noin 0,5 mmol/l	20-25 min	25-30 min
Hiilidioksidi 30-40 mg/l Alkaliteetti noin 1,0 mmol/l	40-60 min	yli 60 min

Kuten taulukosta 2.6 nähdään, kalkkikiven raekoko vaikuttaa merkittävästi suodattimessa vaadittavaan teholliseen viipymään. Pienemmän raekoon kalkkikivi alkoi käsiteltävää vettä nopeammin, koska käytetyn kalkkikiven ja veden välisen kontaktipinnan koko on kääntäen verrannollinen raekokoon, joten raekoon pienentyessä kontaktipinta ja samalla alkalointinopeus kasvavat (kuva 2.6). Pienten raekokojen käyttö onkin yleistynyt vesilaitoksilla niiden paremman alkalointitehon takia. (Meriluoto 2002)



Kuva 2.6 Kalkkikiven raekoon vaikutus alkalointinopeuteen (Meriluoto 2002)

Tehollinen viipymä lasketaan suodatinpatjan tehollisen vesitilavuuden perusteella. Suodatinpatjan tehollinen vesitilavuus saadaan kertomalla kalkkikivipatjan irtotilavuus kalkkikiven huokoisuudella ($\approx 0,4$). Kun kalkkikivisuodattimessa vaadittu tehollinen viipymä tunnetaan, voidaan kalkkikiven irtotilavuus laskea kaavalla (5):

$$V_{\text{kalkkikivi}} = \frac{t_{\text{eff}} \times q_{\text{mit}}}{60 \times \alpha}, \quad (5)$$

missä t_{eff} on tehollinen viipymä, q_{mit} mitoitusvirtaama ja α on kalkkikiven huokoisuus. Taulukon 2.6 ja kaavan (5) avulla voidaan alustavasti arvioida suodattimessa tarvittavan kalkkikiven määrää. Käytännössä määrä kannattaa varmistaa pilot-kokeiden avulla, koska kokeiden toteuttaminen on yksinkertaista ja kustannuksiltaan melko edullista. (Meriluoto 2002)

Mitoitettaessa pientä kalkkikivialkalointiyksikköä voidaan mitoitus yleensä tehdä hieman tarvittua suuremmaksi, koska kalkkikivellä alkaloinnissa ei ole ylikalkoitumisen vaaraa. Hieman tarvittua suurempi mitoitus kompensoi pienillä laitoksilla usein esiintyviä suuria kulutusvaihteluja, joita pienten laitosten verkoston säiliötilavuus ei usein pysty tasoittamaan, ja parantaa näin alkaloinnin toimivuutta suurien virtaamien aikana. Pienen kalkkikivisuodattimen rakennuskustannuksiin viipymän pidentäminen ei merkittävästi vaikuta. (Kuorikoski & Palomäki 2001)

Suuria kalkkikivialkalointiyksiköitä tehtäessä viipymä on pyrittävä mitoittamaan mahdollisimman tarkasti kalkkikivisuodattimen vaatiessa paljon tilavuutta käsiteltyyn vesimäärään nähden. Näin pystytään rajoittamaan ylimitoituksesta aiheutuvia ylimääräisiä kustannuksia, jotka suurilla laitoksilla ovat merkittäviä. Lisäksi suodattimeen tulevan veden laatu on pyrittävä optimoimaan tarvittavan viipymän minimoimiseksi. Käytännössä optimointi tarkoittaa veden hiilidioksidipitoisuuden säätöä joko hiilidioksidia lisäämällä tai vettä ilmastamalla. (Kuorikoski & Palomäki 2001)

Suodattimen huuhteluun tarvittavat rakenneosat mitoitetaan lähinnä suodattimen pinta-alan mukaan. Huuhtelun tarve ja mitoitus on huomioitava myös suodattimia mitoitettaessa. (Meriluoto 2002)

2.3.3 Kalkkikiven kuluminen

Kalkkikiven kulumista voidaan laskea teoreettisesti kaavassa (2) esitetyn kalkkikiven ja veden sisältämän hiilidioksidin välisen reaktion avulla. Kaavan (2) mukaan reaktioon osallistuvien kalkkikiven ja hiilidioksidin ainemäärät ovat yhtä suuret, joten sidottaessa 1 mooli hiilidioksidia käytetään 1 mooli kalkkikiveä.

Ainemäärä voidaan laskea kaavalla (6):

$$n = \frac{m}{M} \leftrightarrow m = nM. \quad (6)$$

missä n on ainemäärä, m on massa ja M on moolimassa. (Seppänen et al. 2006)

Kaavojen (2) ja (6) avulla voidaan täten laskea kuluvan kalkkikiven massa sidottua hiilidioksidigrammaa kohti sijoittamalla kaavaan (6) hiilidioksidin (44,009 g/mol) ja kalkkikiven (100,086 g/mol) moolimassat. Kaavojen mukaan laskettuna yhden hiilidioksidimilligramman sitomiseen kuluu 2,27 milligrammaa kalkkikiveä. (Kuorikoski & Palomäki 2001)

Käytännössä kalkkikiven kulutus on hieman suurempi, koska hienojakoista kalsiumkarbonaattia voi karata esimerkiksi huuhteluvesien mukana kalkkikivisuodattimen vaatiessa huuhtelua (Iivari 2008). Karttunen et al. (2004) antavat kalkkikiven kulumiselle käytännön arvon 2,5 milligrammaa yhtä sidottua hiilidioksidimilligrammaa kohti.

Kalkkikiven kuluessa kalsiumkarbonaatti liukenee veteen, jolloin suodattimen tehollinen tilavuus laskee. Koska suodatin mitoitetaan tehollisen tilavuuden perusteella, on suodattimelle lisättävä kalkkikiveä tilavuuden laskiessa tarpeeksi, ja suodattimen tehollisen tilavuuden vaihtelut on huomioitava suodatinta mitoitettaessa.

2.3.4 Mixed bed-suodatin

Mixed bed-suodatin on suodatin, jonka suodatinmassa koostuu useammasta eri materiaalista. Mixed bed-suodattimen suodatinmassana voidaan käyttää esimerkiksi hiekan ja kalkkikiven sekoitusta materiaalien erilaisilla suhteilla. Mixed bed-suodatin on pääasiassa fysikaalinen suodatin, mutta siinä tapahtuvien kemiallisten reaktioiden takia se voidaan luokitella myös kemialliseksi suodattimeksi. Mixed bed-suodattimella voi normaalin hiekkasuodattimen tavoin esiintyä myös biologista toimintaa. (Zolas 2010)

Lisäämällä hiekkasuodattimeen kalkkikiveä voidaan tietyissä tapauksissa korvata erilliset, veden alkalointiin käytettävät prosessiyksiköt. Mixed bed-suodattimessa tapahtuva veden alkaloituminen on suodattimella olevan kalkkikiven ansiota, joten menetelmän vahvuudet ja heikkoudet ovat samat kuin tavallista kalkkikivisuodatinta.

Suodattimelta kuluu kalkkikiveä kalsiumkarbonaatin ja hiilidioksidin välisten reaktioiden seurauksena, ja sitä joudutaan välillä lisäämään. Suodattimille lisättävä kalkkikivi ja suodattimen hiekka sekoittuvat suodattimessa huuhteluiden aikana (Otamo 2016, Vuorilehto 2016a).

3. AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Tutkimuksen koeajot

Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa lähtötietoja Seinäjoen Veden omistaman Jouppilanvuoren vesilaitoksen saneerauksen suunnittelua varten. Seinäjoen Energia Oy:n liiketoimintayksikkö Seinäjoen Vesi vastaa 61 000 asukkaan sekä Seinäjoen alueen teollisuuden talous- ja jätevesihuollosta (Seinäjoen Vesi). Koeajoissa vertailtiin Jouppilanvuoren laitoksella mahdollisesti käytettäviä saostuskemikaaleja sekä tutkittiin edellytyksiä kemiallisen jälkialkaloinnin korvaamiseen käyttämällä suodattimilla hiekan ja kalkkikiven seosta.

Käsittelykokeet aloitettiin laboratoriomittakaavan astiakokeilla, joissa vertailtiin vaihtoehtoisten saostuskemikaalien toimivuutta eri pH-alueilla ja eri annostuksilla. Tämän jälkeen tehtiin pilot-mittakaavan kokeet, joissa prosessi koostui pikasekoituksesta, hämmennyksestä sekä flotaatiosta. Lisäksi koelaitteistoa ajettaessa otettiin käyttöön koesuodattimet. Tulosten perusteella valittiin kemikaali, jolla tehtiin täyden mittakaavan koeajoja vesilaitoksella.

Aiempien Ulvilan (2008) käsittelykokeiden perusteella työssä vertailtiin ainoastaan Kemwater PAX-XL60 sekä Kemwater PIX-322 (Kemira). Saostuskemikaalien tärkeimmät kemialliset ja fysikaaliset tiedot ovat taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1 Saostuskemikaalien kemialliset ja fysikaaliset tiedot (Kemira 2008, Kemira 2011)

Parametri	PAX-XL60	PIX-322
Ulkomuoto	Kellertävä neste	Tummanruskea neste
Tiheys (kg/m ³)	1310±50	1575±50
Suositeltava säilytyslämpötila (°C)	>0	>0
pH	1,5	<1,0
Fe ³⁺ (p-%)	<0,1	12,5±0,3
Al ³⁺ (p-%)	7,8±0,5	0

Apukoagulanttina tutkittiin aiemmin laitoksella käytetyn Magnafloc LT31 (BASF) lisäksi Seinäjoen Veden toisella pintavesilaitoksella käytössä olevaa Floquat FL2650SEP:tä (SNF Finland).

3.2 Jouppilanvuoren pintavesilaitos

3.2.1 Nykyinen laitos

Jouppilanvuoren vesilaitos on 1960-luvulla rakennettu pintavesilaitos. Laitosta on saneerattu viimeksi vuonna 2011 ja se toimii nykyisin vain poikkeustilanteissa Seinäjoen alueen varavesilaitoksena. Vuoden 2011 saneerauksessa tavoitteena oli varmistaa laitoksen toimivuus varavesikäytössä, joten laitokselle ei ole rakennettu toimivaa automaatiota vaan sen prosessia ohjataan käsin. Laitoksen mitoitusvirtaama on 1000 m³/h kaikkien yksiköiden ollessa käytössä.

Vesilaitos ottaa raakavetensä Törnävänlammen jokirannasta. Raakavesipumppaamolla on kaksi pumppua, joista vain toinen on toimintakuntoinen. Pumppu toimii vakioteholla tuottaen laitokselle 645 m³/h virtaaman. Raakavesipumppuja ei ole uusittu vaan ne ovat alkuperäiset, 1960-luvulla hankitut pumpput. Laitokselle pumpattu vesi tulee laitoksella tulokouruun, jossa siihen sekoitetaan koagulantti ja esialkaloinnissa nykyisin käytetty kalkki. Raakavesipumppaamon ja laitoksen välistä putkea ei ole saneerattu, joten sen kunnosta ei ole tarkkaa tietoa. Raakavesiputken pituus on noin 2,5 km.

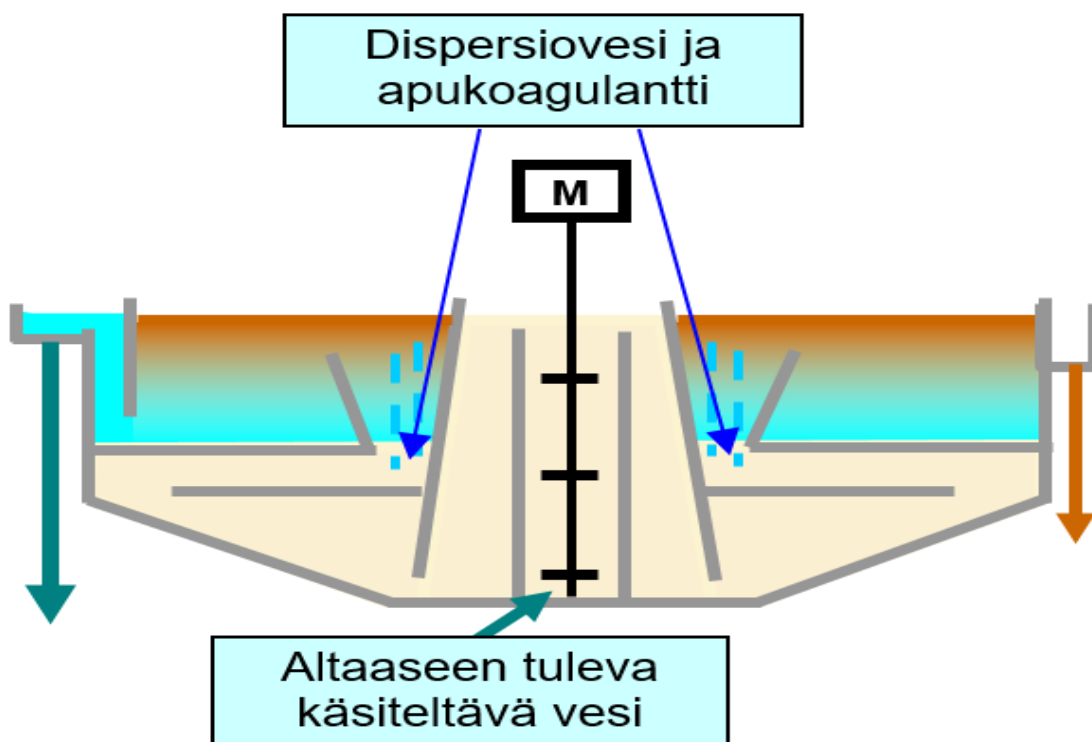
Raakaveden laatua on tarkkailtu kuukausittain huhtikuusta 2016 lähtien Törnävän raakavesipumppaamolta sekä jokeen yhteydessä olevasta Kyrkösjärvestä otetuista näytteistä. Yhteenvedo huhti–joulukuussa 2016 otetuista raakavesinäytteistä on taulukossa 3.2. Kesän 2016 aikana raakaveden laatu heikkeni etenkin Törnävän raakavesipumppaamolla satteisten ajanjaksojen aikana, jolloin myös veden pH laski. Kaikki tulokset raakavesinäytteistä tehdyistä analyyseistä on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 3.2 Raakavesinäytteiden ominaisuudet huhti–joulukuussa 2016

Parametri	Törnävän RV-pumppaamo	Kyrkösjärvi
Alkaliteetti (mmol/l)	0,02–0,25	0,07–0,13
Mangaani (µg/l)	28–160	31–100
KMnO ₄ -luku (mg/l)	99–300	110–140
pH	5,2–7,0	6,0–6,7
Rauta (µg/l)	1600–3000	1200–2200
Sähkönjohtavuus (µS/cm)	69–97	40–63

Esialkaloinnin ja koagulantin lisäämisen jälkeen vesi johdetaan pikasekoituksen kautta flotaatiolla toimiviin selkeytysaltaisiin (kuva 3.1). Selkeytysaltaita laitoksella on kolme, joista pienin ei ole ollut käytössä laitoksen toimiessa varavesikäytössä toimintahäiriöiden ja huonon puhdistustuloksen takia. Tuleva vesi jaetaan kahteen käytössä olevaan selkeytysaltaaseen käsikäyttöisten säätöventtiilien avulla. Pienin selkeytysallas on nykyisin käytössä vain raakaveden varastoaltaana. Altaaseen varastoidaan vettä laitoksen lähellä sijaitsevien laskettelurinteiden lumetusta varten. Käytössä olevien kahden selkeytysaltan pinta-ala on yhteensä noin 260 m². Käytöstä poistetun altaan pinta-ala on alle 40 m².

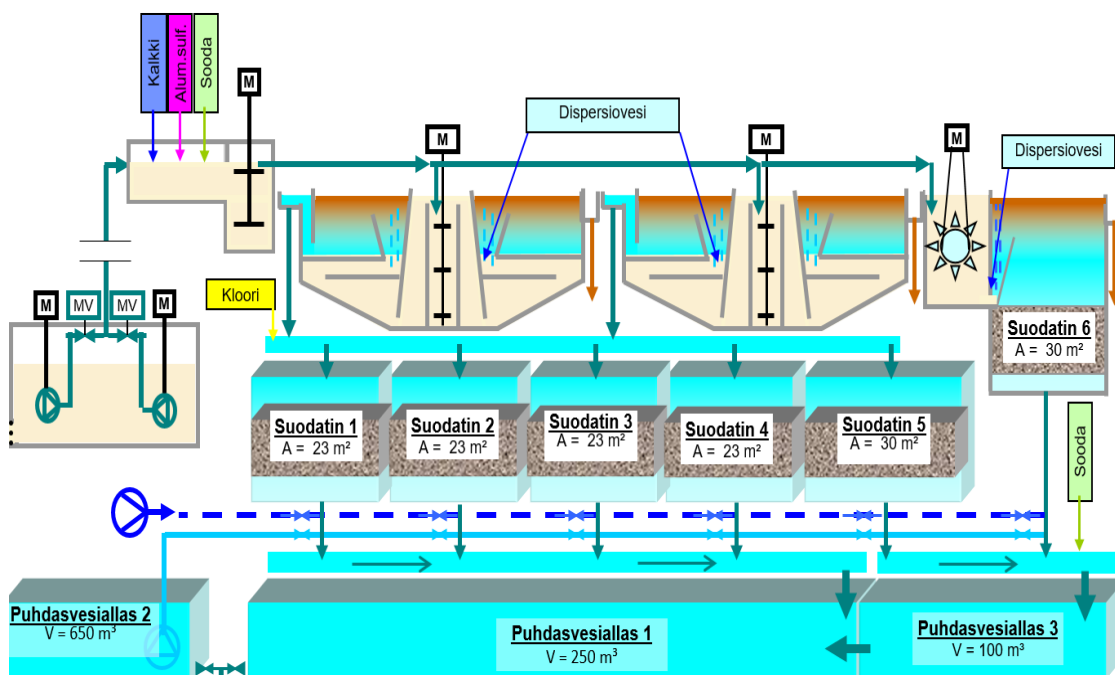
Pikasekoituksesta tuleva vesi purkautuu selkeytysaltaiden keskellä sijaitsevaan hämmennykseen. Hämmennysosan tilavuus on molemmissa selkeytysaltaissa 70 m^3 . Hämmennyksen jälkeen vesi purkautuu varsinaiseen selkeytykseen. Selkeytysaltaiden hämmennyksestä purkautuvaan veteen syötetään dispersioilman lisäksi laitoksella käytössä oleva apukoagulantti. Laitoksen selkeytysaltaat on saneerattu vuonna 2011. Saneerauksen yhteydessä altaisiin rakennettiin väliseiniä hämmennyksestä tulevassa vedessä olevien kemikaalien riittävän pitkän reaktioajan varmistamiseksi.



Kuva 3.1 Selkeytysaltaan rakenne (muokattu lähteestä Jouppila et al. 2010)

Selkeytyksestä lähtevä vesi johdetaan kourun kautta hiekkasuodatukseen. Selkeytyksen ja suodattimien välissä olevaan kouruun lisätään laitoksella veden desinfiointiin käytetty hypokloriitti. Suodattimia laitoksella on kuusi, joista viisi on käytössä laitoksen ollessa toiminnassa. Laitoksen yksi suodatin on pois käytöstä, koska se on yhteydessä käytöstä poistettuun selkeytysaltaaseen. Laitoksen suodattimien pinta-ala on 152 m^2 , josta käytössä olevien viiden suodattimen osuus on 122 m^2 . Suodattimille mahtuu noin 120 cm paksuinen suodatinmassa.

Suodatuksen jälkeen veteen lisätään laitoksella jälkialkaloinnissa käytettävä sooda ja se ohjataan kolmeen puhdasvesialtaaseen, joiden yhteenlaskettu tilavuus on 1000 m^3 . Puhdasvesialtaiden lisäksi vettä voidaan varastoida laitoksen vieressä oleviin alavesisäiliöihin. Laitoksen prosessi kaikkien prosessiyksiköiden ollessa käytössä on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2 Jouppilanvuoren vesilaitoksen prosessikaavio (muokattu lähteestä Jouppila et al. 2010)

Laitoksen vieressä sijaitsevan alkuperäisen alavesisäiliön tilavuus oli 5000 m^3 ja vuonna 2016 säiliö saneerattiin ja sen viereen rakennettiin kaksi lisäsäiliötä, joiden yhteenlaskettu tilavuus on 5000 m^3 ($4000 \text{ m}^3 + 1000 \text{ m}^3$). Kaikkiaan laitoksen vieressä olevien kolmen alavesisäiliön tilavuus on nykyään siis $10\,000 \text{ m}^3$. Normaalitilanteessa saneeratun laitoksen käyttöön on suunniteltu 1000 m^3 säiliö. Muut kaksi säiliötä ovat käytössä Lakeuden Vesi Oy:n Kauhajoen ja Kurikan suunnasta toimittaman, pohjavedestä valmistetun talousveden varastoinnissa ennen veden pumppaamista Seinäjoen alueen verkostoon.

Nykyisin laitoksella koaguloinnissa ja alkaloinnissa käytössä olevat kalkki, alumiinisulfaatti ja sooda tuodaan laitokselle säkkitavarana ja kaadetaan vuoden 2011 saneerauksen aikana uusittuihin siiloihin, joista ne syötetään laitokselle tulevaan veteen. Apukoagulantti tuodaan laitokselle tynnyrissä, minkä jälkeen siitä tehdään valmiiksi laimennettu liuos säiliöön. Säiliöstä apukoagulanttiliuos pumpataan prosessin selkeytysaltaisiin, samaan kohtaan dispersioveden kanssa. Kemikaalisiilojen ja apukoagulanttisäiliön täyttö tapahtuu nykyisellään käsin, joten laitos vaatii jatkuvan miehityksen sen ollessa toiminnassa.

3.2.2 Laitokselle suunniteltu saneeraus

Suunnitellun saneerauksen tavoitteena on saada laitos jatkuvaan käyttöön korvaamaan nykyisin käytössä oleva Nurmon vanha pintavesilaitos Atria Oyj:n Nurmon Lihakylän tarvitseman veden tuotannossa. Nurmon pintavesilaitos poistetaan käytöstä sen vaatiman saneerauksen huonon kannattavuuden vuoksi. Lisäksi Jouppilanvuoren vesilaitoksen saneeraus on tarkoitettu mitoittamaan niin, että vesilaitos pystyy tulevaisuudessakin toimimaan

Seinäjoen alueen varavesilaitoksena poikkeustilanteissa jatkuvan toimintansa ohella. (Puska 2015)

Laitoksella on suoritettu vuonna 2011 koeajoja käyttäen saostuskemikaalina PIX-322:ta ja PAX-XL60:tä. Koeajot ovat toimineet taustana sekä saneerausta että tässä työssä suoritettuja käsittelykokeita suunniteltaessa. Yhteenveto koeajojen tuloksista on esitetty taulukoissa 3.3 (PAX-XL60) ja 3.4 (PIX-322). (Päkkilä 2015)

Taulukko 3.3 PAX-XL60 koeajojen tulokset (Päkkilä 2015)

Päivä PAX-annostus (g/m3)	20.1.2011 115,2			26.1.2011 108,9			27.1.2011 105,8		
	RV	F	LV	RV	F	LV	RV	F	LV
pH	6,6	6,6	7,8	6,5	6,8	8,6	6,5	6,7	8,7
KMnO ₄ -luku (mg/l)	99	29	17	90	32	27	90	35	21
Alumiini (µg/l)			390			320			150
Alkaliteetti (mmol/l)	0,22	0,24	0,54	0,21	0,33	0,58	0,21	0,25	0,56
Hiilidioksidi (mg/l)	11	12	1,7	13	10	<1,0	13	10	<1,0 ²

Taulukko 3.4 PIX-322 koeajojen tulokset (Päkkilä 2015)

Päivä PIX-annostus (g/m3)	2.2.2011 134,1			3.2.2011 117,2		
	RV	F	LV	RV	F	LV
pH	6,6	4,3	6,9	6,6	6,6	7,5
KMnO ₄ -luku (mg/l)	86	19	9	95	27	14
Rauta (µg/l)	2500	3300	250	2300	1600	200
Alkaliteetti (mmol/l)	0,22	ei mitattu	0,36	0,21	ei mitattu	0,45
Hiilidioksidi (mg/l)	11	ei mitattu	9,1	11	ei mitattu	2,8

Saneerauksen tavoitteena oleva Jouppilanvuoren vesilaitoksen jatkuva käyttö vaatii laitoksen toiminnan automatisointia sekä kemikaalien syötön muuttamista niin, ettei laitoksella tarvita jatkuvaa miehitystä sen ollessa käynnissä. Laitokselle laaditussa yleissuunnitelmassa esitettiin alustavasti laitoksella käytettäväksi kemikaaleina PIX-322:ta saostuksessa, kalkkia esialkaloinnissa ja soodaa jälkialkaloinnissa. Suuria rakenteellisia muutoksia laitokselle ei alustavassa suunnitelmassa ollut lukuun ottamatta rakennusta, johon oli tarkoitus sijoittaa kemikaalien varastointitilat. (Puska 2015)

Käsittelykokeiden perusteella tarkasteltiin vaihtoehtoisia ratkaisuja yleissuunnitelmassa esitetyille kemikaaleille ja vertailtiin niiden toimivuutta Jouppilanvuoren laitoksella. Tavoitteena oli saneeratun laitoksen toimintavarmuuden parantaminen, sen käytön ja toiminnan ohjaamisen helpottaminen sekä saneerauskustannusten minimointi. Alustavan

² RV tarkoittaa raakavettä, F flotaatiosta lähtevää vettä ja LV laitoksen lähtevää vettä.

suunnitelman mukaan laitoksen saneerauskustannuksiksi on arvioitu noin miljoona euroa (Puska 2015).

Alustavan suunnitelman laatimisen jälkeen oli lisäksi harkittu mahdollisuutta kemiallisen jälkialkaloinnin korvaamiseen käyttämällä suodattimilla hiekan ja kalkkikiven sekoitusta. Laitoksen suodatinten tilavuus on rajallinen (n. 146 m³) ja sen kasvattaminen vaatisi merkittäviä rakenteellisia muutoksia lukuun ottamatta laitoksen kuudennen suodattimen käyttöönottoa, jonka järjestäminen olisi melko helppoa. Ottamalla kuudes suodatin käyttöön tilavuus olisi n. 180 m³. Suodattimen käyttöönotto vaatisi vain 2 käytössä olevasta selkeytysaltaasta tulevan veden jakamista kuudelle suodattimelle viiden suodattimen sijaan ja pienimmän selkeytysaltaan eristämistä. Tilavuuden ollessa riittävä kalkkikiven lisääminen suodattimille olisi kuitenkin helppo ja toimintavarmuudeltaan hyvä ratkaisu jälkialkalointiin. Lisäksi kalkin vaatimien syöttöjärjestelyjen kunnossapito vaatii enemmän työtunteja kuin kalkkikiven lisääminen suodattimelle, joten kalkkikiven lisääminen suodattimille olisi myös kustannustehokas ratkaisu. (Päkkilä 2016)

Vedenkäsittelylaitoksen uudistamisen lisäksi saneerauksen yhteydessä on suunniteltu uuden raakavesipumppaamon rakentamista Kyrkösjärven rantaan vanhan jokirannassa sijaitsevan Törnävänlammen pumppaamon saneerauksen sijaan (Puska 2015). Rakentamisen kannattavuuden arvioimiseksi käsittelykokeiden tuloksia erilaisilla raakaveden laaduilla vertailtiin nykyiseltä pumppaamolta ja Kyrkösjärvestä huhti-joulukuussa 2016 kuukausittain otettuihin raakavesinäytteisiin.

3.3 Astiakokeet

Laboratoriomittakaavassa tehtyjen astiakokeiden tarkoituksena oli verrata saostuskemikaalien toimivuutta kemikaalin eri annostuksilla ja eri pH:ssa. Lisäksi tarkoituksena oli tuottaa lähtötietoa pilot-koelaitteistolla tehtävien kokeiden suunnitteluun.

Raakavesinäytteet haettiin laitoksen nykyisen raakavesipumppaamon vierestä Törnävänlammen rannasta. Kokeet tehtiin laboratoriolaitteistolla (kuva 3.3), pH:n säätöön käytettiin 1 % natriumhydroksidiliuosta.



Kuva 3.3 Astiakokeissa käytetty saostuslaitteisto

Kokeessa litraan raakavettä lisättiin natriumhydroksidi ja kokeiltavana oleva saostuskemikaali, minkä jälkeen vettä sekoitettiin (10 s) ja hämmennettiin (10 min). Viimeisenä vaiheena nestettä laskeutettiin (15–20 min). Laskeutuksen jälkeen nesteen pinnasta otettiin näyte kaatamalla. Pikasekoitus- ja hämmennysaika valittiin vesilaitoksen altaiden tilavuuksien ja mitoituksen perusteella. Käytettyä laskeutusaikaa vaihdeltiin raakaveden laadusta ja käytetystä saostuskemikaalista riippuen. Flokin laskeutuvuudella ei ole merkitystä laitoksen selkeytyksen toimiessa flotaatiolla.

Alussa käytetyt kemikaaliannostukset valittiin koejakson alussa vuoden 2011 koeajojen ja aiemmin laitoksella tehtyjen saostuskokeiden perusteella. Koejakson alussa saostuksen pH valittiin kummallekin kemikaalille aiempien saostuskokeiden tulosten perusteella. Kokeiden edetessä päädyttiin kokeilemaan useampia pH-olosuhteita keskittyen PAX-XL60:llä välille 5,4–6,4 ja PIX-322:lla välille 4,0–5,2.

Saostuksen toimivuutta eri kemikaaliannostuksilla ja pH-olosuhteissa verrattiin aluksi silmämääräisesti. Toimivan kemikaaliannostuksen ja saostus-pH:n karkean määrittämisen jälkeen saostustuloksia verrattiin ottamalla näytteet sekä raakavedestä että selkeytetyistä vesistä.

Tulosten perusteella havaittiin, että sopiva kemikaaliannos oli PAX-XL60:lle noin 0,8–1,2 ja PIX-322:lle noin 1,1–1,7 kertaa raakaveden permanganaattiluku, joten tuloksissa keskityttiin näillä kemikaaliannoksilla käsiteltyihin näytteisiin. Lisäksi tuloksissa pyrittiin poistamaan raakaveden laadun vaihtelun merkitys ottamalla huomioon vain ne näytteet, joissa käytetyn raakaveden permanganaattiluku oli 120–140 mg/l.

Käytettävän kemikaaliannostuksen tarkkaa määrittämistä vaikeutti raakaveden laadun voimakas vaihtelu ja päivittäisten laboratoriotulosten puuttuminen. Näiden syiden takia kemikaaliannostuksen ja raakaveden laadun, erityisesti permanganaattiluvun, välinen yhteys selvisi vasta noin viikko kokeiden tekemisen jälkeen eikä käytettyä kemikaaliannostusta voitu valita raakaveden laatutietojen perusteella.

3.4 Pilot-kokeet

3.4.1 Koelaitteisto

Kokeita varten koelaitteiston vaakaselkeytys muutettiin flotaatiolla toimivaksi selkeytykseksi lisäämällä laitteistoon erillinen dispersiovesisäiliö ja dispersioveden syöttö selkeytysaltaaseen. Kokeissa käytetyt laitteiston osat olivat pikasekoitus-, hämmennys- sekä selkeytysallas (kuva 3.4). Laitteistoon menevän virtaaman mitoituksen kannalta merkittävä koelaitteiston selkeytysallas on kooltaan 62 cm*62 cm ($\approx 0,4 \text{ m}^2$). Selkeytysaltaasta tuleva vesi johdettiin 10 l puhdasvesialtaaseen.



Kuva 3.4 Kokeissa käytetty koelaitteisto

Puhdasvesialtaasta vesi pumpattiin kahdella kemikaalipumpulla koesuodattimille. Koesuodattimien suodatinpatjaan oli alustavasti suunniteltu useammasta eri massasta tehtyä sekoitusta, jossa olisi kalkkikiveä, hiekkaa sekä mahdollisesti aktiivihiiltä, mikäli veden permanganaattilukua ei muuten saataisi laskemaan riittävästi.

Koesuodattimilla käytetty hiekka oli Jouppilanvuoren vesilaitoksen hiekkasuodattimesta, kalkkikivi toisen Seinäjoen Veden vesilaitoksen suodattimelta. Kalkkikiven ollessa käytettyä sen raekoko oli pienentynyt alkuperäisestä 2–4 mm koosta ja toisaalta kalkkikivi ei ollut enää täysin puhdasta.

3.4.2 Kokeiden suoritus

Pilot-laitteistoa ajettiin 19 päivänä ajan noin 6-7 h/d. Aluksi lähtevän veden sameutta arvioitiin silmämääräisesti. Laitteiston toiminnan silmämääräisesti tasaannuttua otettiin viitenä päivänä näytteet raakavedestä, selkeytetystä vedestä sekä suodatetusta vedestä, jonka katsottiin vastaavan laitoksen lähtevää vettä.

Raakavesi kerättiin aluksi 800 litran säiliöön, jossa siihen sekoitettiin lipeä, minkä jälkeen vesi johdettiin koelaitteistoon. Laitteistoon menevä virtaama pohjautui suunnitellun laitoksen normaalitilanteen virtaamaan (100 m³/h). Normaalitilannetta käytettiin, koska sitä ei laitosmittakaavan koeajoissa olisi mahdollista kokeilla. Saneeratun Jouppilanvuoren vesilaitoksen mitoitustilanteen virtaama pystyttäisiin kokeilemaan laitosmittakaavan koeajojen aikana.

Aluksi laitteistoon menevä virtaama määritettiin suoraan laitteiston selkeytyksen ja suunnitellun laitoksen selkeytyksen pinta-alojen suhteella, mutta pian virtaama kasvatettiin vastaamaan tilannetta jossa vain toinen saneeratun laitoksen selkeytysaltaista olisi käytössä. Selkeytysaltaiden pinta-alojen suhteilla lasketuista laitteistoon menevien virtaamien ja laitokselle tulevien virtaamien vastaavuuksista on esitetty taulukossa 3.5.

Taulukko 3.5 Koelaitteiston selkeytykseen ja Jouppilanvuoren laitoksen selkeytykseen virtaavien vesimäärien vastaavuus

	Koelaitteisto	Jouppilanvuoren laitos
Pinta-ala (m ²)	0,4	260
Virtaama (m ³ /h)	0,150	100
Virtaama (m ³ /h)	0,300	200

Saostuksessa käytetyt kemikaalit PAX-XL60 ja PIX-322 laimennettiin 5 % liuokseksi astiaan, josta liuos pumpattiin kemikaalipumpulla laitteiston pikasekoitusaltaaseen. Kemikaaliannostuksena käytettiin 100 ml/m³ koko koeajon ajan, koska luotettavampia tuloksia kemikaaliannostelun tarkasta määrästä oli saatavissa koko laitosmittakaavassa tehtävien koeajojen aikana ja annostuksen säätelyä vaikeutti kemikaaliannostuksen suhteuttaminen permanganaattilukuun päivittäisten laboratoriotulosten puuttuessa.

Koeajoissa käytettiin pääasiassa PAX-XL60:tä sen toimiessa paremmin laitoksen käyttöön sopivalla pH-alueella. PIX-322:ta kokeiltiin yhtenä päivänä. Kemikaalia vaihtaessa laitteistoa ajettiin aina yksi päivä ennen näytteenottoa veden vaihtumisen varmistamiseksi.

Selkeytyksen jälkeisestä puhdasvesialtaasta koesuodattimille johdettava virtaama määritettiin laskennallisesti koesuodattimen pinta-alan ja laitoksen suodattimien pinta-alan suhteen sekä laitoksen normaalitilanteen virtaaman avulla. Koesuodattimien ja Jouppilanvuoren vesilaitoksen suodattimille virtaavien vesimäärien vastaavuus on esitetty taulukossa 3.6.

Taulukko 3.6 Koelaitteiston suodattimeen ja Jouppilanvuoren laitoksen suodatukseen virtaavien vesimäärien vastaavuus

	Koesuodatin	Jouppilanvuoren laitos
Pinta-ala (m ²)	0,01227	122
Virtaama (m ³ /h)	0,004	80
Virtaama (m ³ /h)	0,008	160

Laitoksen suodattimissa suodatinpatjan paksuus on 120 cm ja koesuodattimille mahtui vain 60 cm suodatinpatja. Suodatinpatjojen paksuuseron takia virtaaman määrittämiseen ei voitu käyttää suoraan pinta-alojen suhdetta vaan pinta-alojen suhteesta saatu virtaama jaettiin kahdella. Näin saatiin varmistettua vedelle mahdollisimman hyvin laitoksen toimintaa vastaava kontaktiaika suodattimilla hiekka-kalkkikiviseoksen toimivuuden määrittämiseksi.

Suurimmat vaikeudet kokeissa liittyivät dispersioveden syöttöjärjestelyyn. Dispersioveden ilmakuplat pyrkivät kasvamaan liian suuriksi ja dispersioveden määrä oli liian pieni suhteessa altaan kokoon. Järjestelyä ei kuitenkaan muutettu, koska aikataulu oli tiukka ja suunnitelmassa oli suorittaa laitoksella koeajoja, joissa käytössä olisi toimiva flotaatio ja kokeiden tulokset varmistuisivat. Lisäksi kahtena päivänä selkeytysaltaan pohjalietettä ei saatu poistettua johtuen lietteenpoistoventtiilin jumiutumisesta. Pohjalietteen kertyminen selkeytysaltaaseen heikensi selkeytyksen toimintaa.

3.5 Laitosmittakaavan koeajot

Kokeiden lopussa ajettiin Jouppilanvuoren vesilaitosta valittuja suodatinmassaa ja saostuskemikaalia käyttäen. Laitoskokeiden tavoitteena oli varmistaa valitun kemikaalin toimivuus laitoksen selkeytyksessä ja suodatinmassan toimivuus kemikaloinnin korvaajana veden jälkialkaloinnissa. Laitosmittakaavan koeajoja tehtiin viisi päivää, joista kaksi ensimmäistä käytettiin prosessin toiminnan tasaamiseen ja kolmena laitosta ajettiin normaalisti.

Koeajoissa käytettiin Jouppilanvuoren laitoksen prosesseja lukuun ottamatta suodattimia, jotka korvattiin halkaisijaltaan 94 cm pilot-suodattimella. Raakaveden virtaamaa ei saatu säädettyä, vaan se oli koeajojen aikana 645 m³/h. Flotaatioaltaista koeajoissa käytettiin kahta nykyisessä varavesikäytössä käytettävää allasta.

Laitoksella oli valmiit syöttöjärjestelyt saostuskemikaalille. Syöttöpiste oli prosessissa sama kuin laitoksella käytössä olleella alumiinisulfaatilla, raakaveden tulokouru. Saostuskemikaalina käytetty PAX-XL60 oli konteissa. Flotaatioaltaiden pintalietteen kaadot ja pohjan lietetaskujen tyhjennykset tehtiin kahden tunnin välein. Dispersiovetä syötettiin altaisiin noin $90 \text{ m}^3/\text{h}$, joka vastaa suunnilleen 15 % laitokselle tulevasta virtaamasta.

Koagulanttia annostellessa kemikaalin määrä suhteutettiin raakaveden permanganaattilukuun. Tarkoituksena oli aloittaa noin 0,8-kertaisesta annoksesta ja päätyä 1,0-kertaiseen annokseen. Toisena päivänä oli tarkoitus ottaa arvo tästä välistä, mutta kemikaalipumpun jumiutumisesta johtuen syötetyn PAX-XL60:n määrä jäi epäselväksi, mutta määrä oli kuitenkin selvästi tarkoitettua pienempi.

Laitoksen esialkaloinnissa käytettiin koeajojen aikana natriumhydroksidia, joka oli laitoksella 50 % liuoksena. Natriumhydroksidi pyrittiin syöttämään niin, että hämmennyksen pH olisi noin 5,8. Natriumhydroksidi syötettiin kemikaalipumpun avulla samaan kohtaan koagulantin kanssa.

Apukoagulantti syötettiin kahdella kemikaalipumpulla samaan prosessin vaiheeseen dispersioveden kanssa. Molemmat kokeillut apukoagulantit syötettiin tämän säiliön kautta. Molempia kokeiltuja apukoagulantteja syötettiin vakiovirtaamalla 2 ml/l .

Koeajojen aikana käytössä oli halkaisijaltaan 94 cm pilot-suodatin (kuva 3.5), jolle vesi pumpattiin selkeytyksestä lähtevästä kourusta. Suodattimen patjan paksuus oli 60 cm. Suodattimen pohjalle asennettiin salaojaputkea suodatinpatjan läpäisseen veden keräämiseksi. Vesi tuotiin venttiilin kautta ulos säiliöstä (kuva 3.5). Salaojaputken lisäksi suodattimen pohjalle laitettiin noin 15 cm kerros salaojasoraa suodatinhiekan karkaamisen estämiseksi.



Kuva 3.5 Koeajoissa käytetty pilot-suodatin

Suodattimella käytetyt virtaamat vastasivat saneeratun laitoksen normaalitilannetta hie-
man suurempia virtaamia. Virtaama suhteutettiin pilot-suodattimen ja laitoksen suodatti-
mien pinta-alojen sekä suodatinpatjan paksuuden avulla. Pilot-suodattimen pohjalla ole-
van salaojasoran päälle tulevaan varsinaiseen suodatinpatjaan laitettiin 30 cm hiekkaa ja
sen päälle 30 cm kalkkikiveä.

Kalkkikiven (Nordkalk) raekoko 2-5 mm. Suodattimessa käytetty hiekka oli Jouppilan-
vuoren laitoksen suodattimesta, joka oli ollut pois käytöstä laitoksen ollessa viimeksi käy-
tössä ja jossa ei siksi ollut vettä. Suodattimelle menevä virtaama vastasi saneeratun lai-
toksen suodattimilla 110–200 m³/h virtaamia.

3.6 Analyysimenetelmät

Laboratorioanalyysissä käytetyt menetelmät on esitetty taulukossa 3.7. Näytteet toimi-
tettiin laboratorioon tunnin kuluessa näytteenotosta, eikä näytteistä tehty rinnakkaisnäyt-
teitä.

Taulukko 3.7 Analyyseissä käytetyt menetelmät

Analyysi	Menetelmä
Alkaliteetti	SFS 3005, 1981
Alumiini	ISO 11885, 2007 (E)
Hiilidioksidi	STDM 4500-CO2 D 1997
Kalsium	ISO 11885, 2007 (E)
Aktiivinen kokonaiskloori	ISO 7393-2, 2000
Vapaa kloori	ISO 7393-2, 2000
Heterotrofinen pesäkeluku	SFS-EN ISO 6222
Koliformiset bakteerit	SFS 3016/2001
Kokonaiskovuus	ISO 11885, 2007 (E)
Magnesium	ISO 11885, 2007 (E)
Mangaani	ISO 11885, 2007 (E)
Permanganaattiluku	SFS 3036, 1981
pH	SFS 3021, 1979
Rauta	ISO 11885, 2007 (E)
Sameus	SFS-EN 7027, 2000

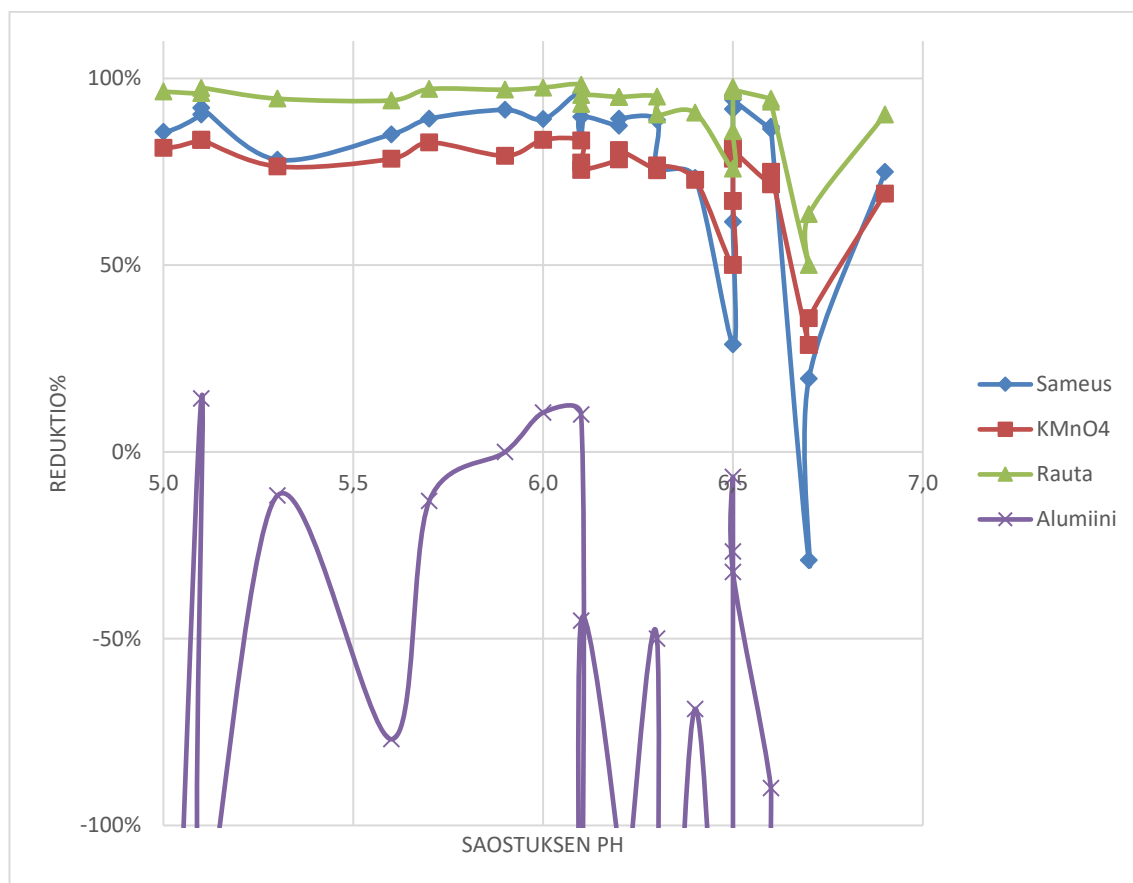
Laboratorioanalyysien lisäksi prosessin puhdistustehoa arvioitiin erityisesti kokeiden alkupuolella silmämääräisesti. Raakaveden korkea humuspitoisuudesta aiheutuva ruskea väri helpotti veden laadun silmämääräistä arviointia.

4. TULOKSET

4.1 Astiakokeet

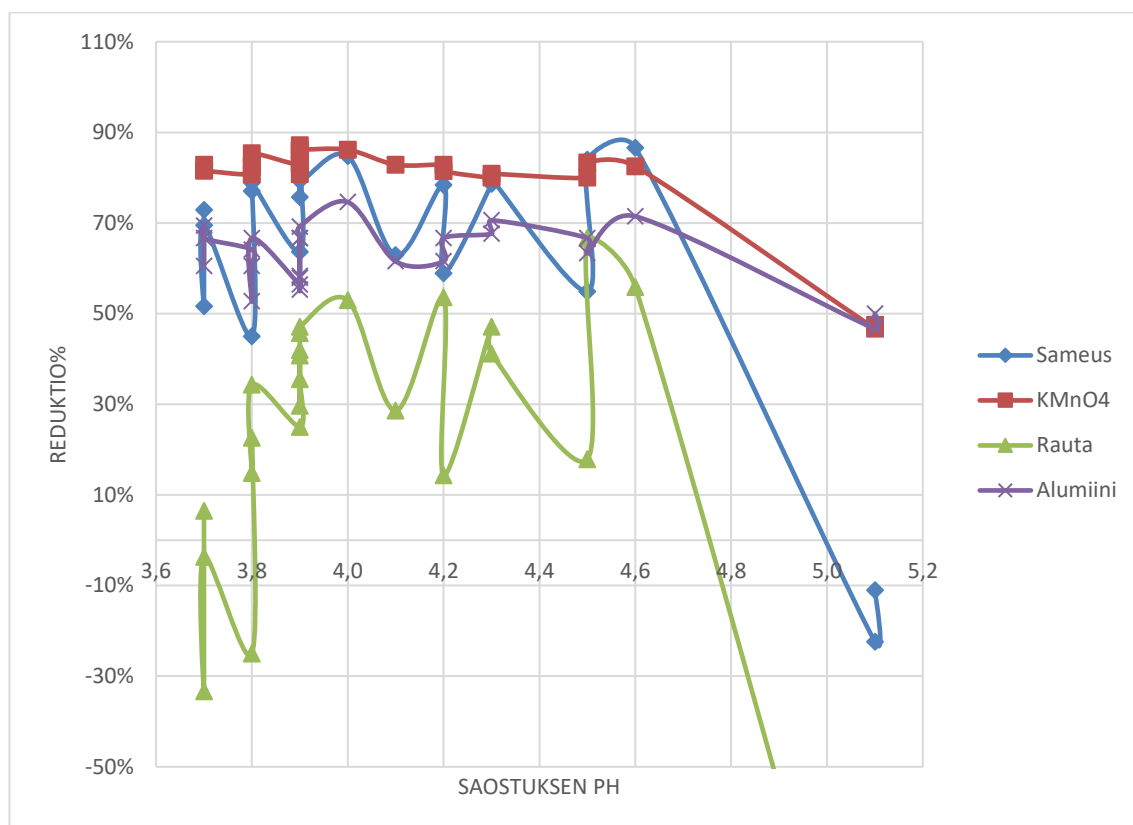
Astiakoejakson loppupuolella otettiin raakavesinäyte sekä kokeiden tuloksena saadut vesinäytteet, joista määritettiin pH, rautapitoisuus, alumiinipitoisuus, permanganaattiluku sekä sameus. Käsiteltyjen näytteiden laatua verrattiin raakaveden laatuun kummankin käytetyn kemikaalin puhdistustehon määrittämiseksi. Astiakokeet tehtiin 2.8.–22.9.2016 välisenä aikana. Laboratorioanalyysyjä tehtiin kaikkiaan 105 käsitellystä vesinäytteestä.

Astiakokeilla suoritettiin käsittelykokeiden ensimmäinen vaihe. Koejakson aikana kehitettiin melko laajasti erilaisia kemikaaliannostuksia ja pH-olosuhteita. Astiakokeiden aikana analysoiduista näytteistä on kerätty käsiteltyjen näytteiden reduktiot verrattuna raakaveden erilaisilla saostuksen pH-olosuhteilla kuvaajiin 4.1 (PAX-XL60:llä käsitellyt näytteet) ja 4.2 (PIX-322:lla käsitellyt näytteet).



Kuva 4.1 Eri parametrien reduktio% astiakokeissa (PAX-XL60)

Kuvasta 4.1 nähdään, että sopivalla kemikaaliannostuksella PAX-XL60:lle toimiva saostuksen pH on noin 5,8–6,0. Tällä pH-alueella näytteen sameus laski yli 80 % ja permanganaattiluku sekä rauta pienenevät vähintään 79 % ilman, että veteen olisi jäänyt merkittäviä (alumiinireduktio% -13–11) pitoisuuksia saostuskemikaalia jäännökseksi. Käsittelyjen näytteiden alumiinireduktion vaihtelut aiheutuvat raakaveden alhaisesta alumiinipitoisuudesta, jonka seurauksena pienikin muutos pitoisuudessa aiheuttaa reduktiossa kymmenien prosenttiyksiköiden muutoksia, sekä muutoksista raakaveden laadussa.



Kuva 4.2 Eri parametrien reduktio% astiakokeissa (PIX-322)

PIX-322:lla parhaiten toimiva saostuksen pH oli astiakokeissa 4,2–4,6 (kuva 4.2). Tällä pH-alueella reduktioiden hajonta aiheutui vaihtelusta raakaveden laadussa, joka hankaloitti erityisesti rautajäännöksen hallintaa käytetyn rautapohjaisen kemikaalin sopivan annostuksen vaikeuden takia. Yhteenveto astiakokeissa käsitellyistä vesinäytteistä havaituista tyypillisistä reduktioista on taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Saostettujen näytteiden tyypillisiä reduktioita astiakokeissa

Parametri	PAX-XL60	PIX-322
Sameus (Reduktio%)	81–96	76–87
Permanganaattiluku (Reduktio%)	75–85	75–85
Alumiini (Reduktio%)	-290–10	55–75
Rauta (Reduktio%)	90–98	22–60

Negatiiviset reduktiot aiheutuvat saostuksessa käytetyn kemikaalin kemikaalijäännöksestä. Tyypillisiä reduktioita valittiin koejakson loppupuolelta, jossa saostusolosuhteet tunnettiin koejakson alkupuolta paremmin.

Kemikaalien puhdistustehossa ei ollut tilastollisesti merkittäviä eroja metallien reduktioita lukuun ottamatta (taulukko 4.1). Metallireduktioiden erot selittyvät sillä, että PAX-XL60 on alumiinipohjainen ja PIX-322 rautapohjainen kemikaali. Raudan alumiinia suuremmat reduktiot aiheutuvat raakaveden suuresta rautapitoisuudesta verrattuna sen alumiinipitoisuuteen.

Laboratorioanalyysien lisäksi näytteitä käsiteltäessä pystyttiin silmämääräisesti havaitsemaan selkeitä eroja näytteiden välillä. Seuraavassa esitetään tärkeimmät kokeiden aikana tehdyt havainnot.

4.1.1 Raakaveden laadun vaikutus puhdistustehoon

Raakaveden laatu vaihteli astiakokeiden aikana osin sateiden mukaan. Pääasiassa raakaveden permanganaattiluku on 120–160 mg/l. Sateisen alkukesän aikana raakaveden permanganaattiluku oli korkeimmillaan 300 mg/l. Koejakson loppua lähestyttäessä sateet vähenivät ja raakaveden permanganaattiluku pieneni aina 110 mg/l asti.

Raakaveden laadun heikentyessä (permanganaattiluvun kohotessa yli 150 mg/l) flokkia muodostui huonosti kaikilla kokeilla kemikaaliannostuksilla. Silmämääräisesti tänä aikana tehtyjen kokeiden lopputuotteena saatu vesi oli selvästi huonompaa verrattuna paremmalla raakavedellä tehtyihin kokeisiin.

4.1.2 Saostuksen pH:n vaikutus puhdistustehoon

Astiakokeissa pH:n säätöön käytettiin 1 % natriumhydroksidiliuosta. Yhtä suurella annostuksella PIX-322:n käyttö vaati natriumhydroksidia hieman enemmän kuin PAX-XL60. Lopullisen pH:n arviointi oli vaikeampaa PIX-322 käytettäessä jyrkemmän titrauskäyrän takia.

Käytettäessä PAX-XL60:tä saostus toimi parhaiten pH:ssa 5,8 ($\pm 0,2$), kun taas PIX-322 toimi parhaiten pH:n ollessa n. 4,4 ($\pm 0,2$). Saostuskemikaaleista PIX-322 oli herkempi pH:n vaihteluille kuin PAX-XL60. PAX-XL60 toimi kohtuullisesti vielä pH:n ollessa 6,4, kun PIX-322:n toiminta puolestaan heikkeni selvästi jo pH:n ollessa muutaman kymmenyksen optimialueen ulkopuolella ($\leq 4,4$ tai $\geq 4,7$), erityisesti pH:n ollessa hieman liian korkea.

Huonolaatuisemman raakaveden käsittely vaati selvästi tarkemman pH:n säädön kuin parempilaatuisen raakaveden.

4.1.3 Kemikaaliannostuksen vaikutus puhdistustehoon

Saostuskemikaalin sopivaa määrää tutkittiin laitoksella vuonna 2011 tehtyjen PAX-XL60- ja PIX-322-koeajojen sekä nykyisen laitoksen toimiessa käytetyn alumiinisulfaattiannoksen (1,1-kertainen annostus suhteessa permanganaattilukuun milligrammoina litrassa) pohjalta. Kemikaaliannostuksen sopiva määrä suhteessa permanganaattilukuun oli PAX-XL60:lle n. 0,9–1,0 mg/l ja PIX-322:lle n. 1,1–1,3 mg/l.

Yleisesti havaittiin, että veden pH:n noustessa hieman suuremmat kemikaaliannostukset toimivat pieniä paremmin, kun taas alhaisemmassa pH:ssa riitti pienempi annostus.

4.2 Pilot-kokeet

Pilot-kokeiden tarkoituksena oli kokeilla astiakokeiden pohjalta valittujen kemikaaliannostuksien toimivuutta flotaatiolla toimivassa selkeytyksessä sekä vertailla erilaisten suodatinmassojen toimivuutta suodattimilla. Lisäksi tavoitteena oli tutkia mahdollisuutta kemiallisen jälkialkaloinnin korvaamiseen suodattimilla käytetyn kalkkikiven avulla.

Koeajon alkupuolella laitteistosta lähtevän selkeytetyn veden laatua tarkkailtiin silmämääräisesti dispersion karkean toiminnan varmistamiseksi. Selkeytetyn veden ollessa silmämääräisesti kirkasta siitä otettiin näytteitä analysoitavaksi. Analyysitulokset koeajon näytteistä on esitetty liitteessä 2.

4.2.1 Selkeytetty vesi

Koeajon molemmilla kemikaaleilla veden humuspitoisuus laski kohtuulliselle tasolle (permanganaattiluku ≤ 35 mg/l) lukuun ottamatta niitä päiviä, jolloin selkeytysaltaaseen oli kertynyt pohjalietettä. PAX-XL60:llä permanganaattiluku vaihteli selkeytyksestä lähtevissä näytteissä välillä 14–27 mg/l ja PIX-322:a käytettäessä (1 koepäivä) arvo oli 35 mg/l. Pienimmät permanganaattiluvun arvot olivat, kun virtaama laitteistoon oli 150 l/h. Virtaama vastaa suunnilleen laitoksen normaalitilanteen virtaamaa 100 m³/h molempien selkeytysaltaiden ollessa käytössä.

Humuspitoisuuden ohella tärkeä saostuskemikaalin valintaan vaikuttava tekijä oli metallijäännöksen määrä. Alumiinijäännös vaihteli PAX-XL60:tä käyttäessä välillä 540–1800 µg/l ja rautajäännös oli suurimmillaan 500 µg/l. Pienimmillään jäännökset olivat kokeiden alkupuolella pienemmällä virtaamalla. PIX-322:lla ajossa rautajäännös oli 7100 µg/l ja alumiinijäännös 150 µg/l. Tärkeimmät parametrit laitoksen selkeytyksen toimivuuden määrittämiseksi ovat permanganaattiluku sekä metallijäännökset. Käsitellyn veden ominaisuuksista on yhteenveto taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2 Pilot-koeajon selkeytetyn veden ominaisuudet

Kemikaali	PAX-XL60	PIX-322
Flotaation pH	5,9–7,4	5,6
Permanganaattiluku (mg/l)	14–27	35
Alumiini (µg/l)	540–1800	150
Rauta (µg/l)	8,5–500	7100
Mangaani (µg/l)	7,8–83	24 ³

4.2.2 Suodatettu vesi

Veden pH nousi molemmilla saostuskemikaaleilla sekä normaalitilannetta vastaavalla virtaamalla (100 m³/h) että 200 m³/h vastaavalla virtaamalla noin 8,3:een kaikilla kalkkikiveä sisältävillä suodatinmassoilla. Suodatetun veden alkaliteetti vaihteli välillä 0,44–0,67, kun suodatinmassasta osa oli kalkkikiveä. Korkeammat alkaliteetit saatiin, kun suodatinmassassa oli enemmän kalkkikiveä suhteessa hiekkaan. Yhteenveto kalkkikivialkaloinnin toiminnasta on koottu taulukkoon 4.3.

Taulukko 4.3 Pilot-koeajon suodatetun veden ominaisuudet

Suodatinmassa	Hiekka-kalkkikiviseos 1:2	Hiekka-kalkkikiviseos 2:1
pH	8,2–8,5	8,1–8,5
Alkaliteetti (mmol/l)	0,56–1,00	0,44–0,73

Selkeytysaltaasta tulevan veden permanganaattiluku laski suodattimilla kaikilla suodatinmassoilla välille 9–14 mg/l. Suodatetun veden permanganaattiluku laski tälle alueella, vaikka selkeytys ei toiminutkaan parhaalla teholla selkeytysaltaaseen kertyneen pohjalietteen takia ja selkeytetyn veden permanganaattiluku oli korkea (≤ 66 mg/l). Metallipitoisuudet laskivat suodattimilla PAX-XL60:tä käytettäessä hyvin lukuun ottamatta niitä päiviä, jolloin selkeytetyn veden alumiinipitoisuus oli hyvin korkea (4200–5200 µg/l) altaaseen kertyneen pohjalietteen takia. PIX-322:ta käytettäessä selkeytyksestä lähtevän veden rautapitoisuus oli niin suuri (7100 µg/l), ettei rautaa jäänyt riittävästi suodattimeen vaan suodatetun veden rautapitoisuus oli 550–980 µg/l.

4.3 Laitosmittakaavan koeajot

Viikon kestäneen koeajon aikana otettiin kolmena päivänä näytteet raakavedestä, selkeytetystä vedestä sekä suodatetusta vedestä. Kaikista näytteistä analysoitiin pH, alkaliteetti, rautapitoisuus, alumiinipitoisuus, mangaanipitoisuus sekä permanganaattiluku. Lisäksi suodatetusta vedestä määritettiin kovuus, kalsium- ja magnesiumpitoisuudet sekä

³ Jätetty huomioimatta 2 päivää, joina selkeytysaltaaseen oli kertynyt toimintaa heikentävää pohjalietettä.

sameus. Laitoksen raakaveden lämpötila oli korkeimmillaan 3,0 °C. Yhteenvedo käsitellyistä vesinäytteiden ominaisuuksista on esitetty taulukossa 4.4, kaikki tulokset laitosmittaavan koeajon aikana tehdyistä analyyseistä on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 4.4 Koeajon vesinäytteiden ominaisuudet

Kemikaaliannos- tus (PAX [mg/l])	23.11.2016 112,1			24.11.2016 136,5			25.11.2016 151,1		
	RV	F	LV	RV	F	LV	RV	F	LV
pH	6,6	5,4	7,6	6,6	5,9	7,5	6,5	5,8	7,6
Alkaliteetti (mmol/l)	0,19	0,03	0,54	0,19	0,05	0,51	0,17	0,05	0,47
Permanganaattiluku (mg/l)	140	39	26	140	41	22	150	28	22
Al (µg/l)	740	1900	280	660	1900	160	570	660	180
Fe (µg/l)	2500	360	68	2400	370	34	2400	115	24
Kovuus (mmol/l)	em.	em.	0,57	em.	em.	0,53	em.	em.	0,51
Ca (mg/l)	em.	em.	18	em.	em.	17	em.	em.	17
Mg (mg/l)	em.	em.	2,7	em.	em.	2,5	em.	em.	2,5
Sameus	em.	em.		em.	em.	0,34	em.	em.	0,34
Virtaama suodattimelle (l/h)			436			554			317
Virtaama vastaa laitoksella (m³/h)			191			243			139 ⁴⁵

4.3.1 Selkeytetty vesi

Selkeytetyn veden permanganaattiluku oli 2 ensimmäisenä päivänä 39 mg/l ja 41 mg/l. Viimeisenä päivänä koagulantin annostuksen kasvattamisen ja pH:n säätämisen jälkeen selkeytetyn veden permanganaattiluku oli 27 mg/l.

Metallijäännöstä oli 1. ja 2. päivän näytteissä 1900 µg/l alumiinia ja 360–370 µg/l rautaa. Kolmantena päivänä prosessi toimi paremmin, minkä seurauksena alumiinia oli 660 µg/l ja rautaa 110–120 µg/l. Mangaania oli 1. päivän näytteessä 64 µg/l ja mittaaminen lopetettiin tähän, koska raakaveden mangaanipitoisuus on hyvin pieni (<100 µg/l).

Koeajon perusteella viimeisenä päivänä käytetty kemikaaliannos toimii parhaiten. Viimeisen päivän kemikaaliannos oli noin 1,0 kertainen raakaveden permanganaattilukuun

⁴ Taulukossa esiintyvä RV tarkoittaa raakavettä, F flotaatiosta lähtevän veden näytettä ja LV suodatetun, eli laitokselta lähtevän, veden näytettä. Virtaama vastaa laitoksella -rivi kuvaa suodattimelle menevää vesimäärää vastaavaa virtaamaa saneeratun laitoksen suodattimille.

⁵ em. = ei määritetty

verrattuna (mg/l). Samoin viimeisenä päivänä käytetty saostuksen pH (5,8) toimi hyvin laitoksen flotaatiossa.

4.3.2 Suodatettu vesi

Suodattimen toiminta veden puhdistuksessa oli pilot-koeajoja heikompaa. Suodatetun veden permanganaattiluku oli 22–26 mg/l ja veteen jäi metallijäännöstä enemmän kuin pilot-koeajojen suodatettuun veteen. Rautaa veteen jäi 21–68 µg/l ja alumiinia 160–280 µg/l.

Puhdistustehon heikkouden lisäksi isompi suodatin ei nostanut pH:ta yhtä paljon kuin pienemmät suodattimet. Suodatetun veden pH nousi 7,6:een hieman laitoksen normaali-tilannetta suuremmalla virtaamalla (137 m³/h vastaava virtaama). Veden pH nousi 7,6:een myös suuremmilla virtaamilla. Suodatetun veden alkaliteetti vaihteli välillä 0,46–0,54 mmol/l.

5. TULOSTEN TARKASTELU

Käsittelykokeiden tuloksia tarkasteltaessa pyrittiin huomioimaan kokeiden tavoitteena oleva saneerauksen suunnittelu. Tarkastelun pohjana erityisesti koelaitteiston ajon ja laitosmittakaavan koeajojen aikana käytettiin sosiaali- ja terveysministeriön talousvedelle asettamia laatusuosituksia. Talousvedelle asetetut laatusuositukset laboratorioon viedyistä näytteistä tehtyjen analyysien osalta taulukossa 5.1 (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015).

Taulukko 5.1 Talousveden laatusuositukset (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015)

Muuttuja	Enimmäisarvo
pH	6,5–9,5
Alumiini (µg/l)	200
Mangaani (µg/l)	50
Rauta (µg/l)	200

Lisäksi talousveden laatusuosituksissa mainitaan sameus, jonka tulee olla käyttäjälle hyväksyttävä (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Laatusuosituksissa mainittujen muuttujien ohella yksi tärkeimmistä parametreista käsittelykokeiden tuloksia arvioitaessa oli veden humuspitoisuutta kuvaava permanganaattiluku. Jouppilanvuoren vesilaitoksen raakaveden humuspitoisuuden ollessa korkea on permanganaattiluvun reduktio hyvä puhdistustehon kuvaaja ja toisaalta humuspitoisen veden kirkastaminen ei onnistu ilman tehokasta humuksen poistoa.

Veden kovuutta ja alkaliteettia tarkkailtiin käsittelykokeiden aikana, koska ne vaikuttavat vesijohtoverkoston korroosioon ja ovat merkittävä muuttuja jälkialkaloinnin toimivuutta tarkasteltaessa. Tämän vuoksi tuloksia vertailtiin sosiaali- ja terveysministeriön laatusuositusten lisäksi laatusuosituksiin verkoston korroosion estämiseksi (taulukko 3.1).

Kokeiden tuloksia ja luotettavuutta tarkasteltaessa pyrittiin huomioimaan kokeissa käytettyjen menetelmien ja laitoksen prosessien väliset erot ja arvioimaan näiden eroavaisuuksien vaikutusta. Lisäksi mahdollisen uuden, Kyrkösjärven rantaan tulevan pumppaamon rakentamisesta aiheutuvat muutokset laitoksen käyttämän raakaveden laadussa ja niiden vaikutukset kokeiden tuloksiin jouduttiin arvioimaan, koska käsittelykokeiden aikana käytettiin vanhan jokirannan pumppaamon vettä. Lisäksi mixed bed-suodattimien osalta vertailtiin tuloksia Suomessa aiemmin tehtyihin vastaaviin kokeisiin (Hiillos 2012).

5.1 Astiakokeet

Astiakokeilla suoritettiin käsittelykokeiden ensimmäinen vaihe, minkä vuoksi pohjatietoa oli rajallisesti saatavilla. Kokeissa kokeiltiin melko laajasti eri kemikaaliannostuksia ja pH-olosuhteita, mikä raakaveden laadun vaihtelun ohella aiheutti melko suuriakin muutoksia laadussa.

Kokeiden tärkein tavoite oli määrittää karkeasti toimivat kemikaaliannostukset sekä kemikaaleille sopivat saostuksen pH-olosuhteet. Yhteenvedo näistä on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2 Yhteenvedo astiakokeiden tuloksista

Kemikaali	PIX-322	PAX-XL60
Annostus suhteessa KMnO ₄ -lukuun (mg/l)	1,1–1,3	0,9–1,0
Saostuksen optimi-pH	4,4 (±0,2)	5,8 (±0,2)

Raakaveden laadun pysyessä kohtuullisena (permanganaattiluku ≤ 150 mg/l) saostus onnistui sekä PAX-XL60 että PIX-322 käyttäen. Käsittelyn veden laadussa ei ollut suurta eroa kemikaalien välillä. Laitoksen saneerauksessa vaihtoehtona oleva jälkialkaloinnin korvaaminen kalkkikivisuodattimilla voisi onnistua paremmin käyttämällä kemikaalia PAX-XL60, koska tällä pystyttäisiin nostamaan pH jo esialkaloinnissa n. 5,8:aan ja pienentämään näin suodattimilla vaadittavaa kontaktiaikaa. Tämän lisäksi parhaiten toimiva annostus oli PIX-322:lla hieman suurempi ja se vaati suurempaa lipeän annostusta esialkaloinnissa.

Raakaveden laatu oli huono vain lyhyen aikaa aikaisessa vaiheessa koejaksoa, joten riittävän suuria annostuksia ei ehkä osattu vielä kokeilla. Tämän takia saostuksen toimivuudesta huonolla raakavedellä ei voida tehdä täysin luotettavia johtopäätöksiä. Todennäköisesti raakaveden laadun heikkenemistä ei kuitenkaan pystytä täysin kompensoimaan suuremmalla kemikaaliannostuksella, vaan selkeytetty vesi jää sameaksi ainakin raakaveden permanganaattiluvun ollessa yli 200 mg/l.

Mahdollista eroa saostuskemikaalien toimivuuteen astiakokeissa verrattuna laitoksen prosesseihin aiheuttaa flokin laskeutuvuuden merkitys puhdistustehoon, kun laitoksen prosesseissa selkeytys toimii flotaatiolla. Tämän lisäksi sateisen alkukesän aiheuttamat suuret vaihtelut nykyisen Jouppilanvuoren laitoksen raakavesilähteenä käytetyn Seinäjoen vedenlaadussa oikean kemikaaliannostuksen valitsemista aiheuttaen hajontaa tuloksiin.

Suodattimia kokeillaan koelaitteiston ajamisen aikana, joten kemikaalien välisen merkittävän eron puuttuessa päätettiin koelaitteistoa ajaa kummallakin kemikaalilla astiakokeissa toimiviksi todetuilla pH-alueilla ja annostuksilla. Kokeileminen aloitettiin PAX-XL60:llä, joka toimiessaan olisi kalkkikivialkaloinnin toimivuuden kannalta parempi saostuskemikaali laitokselle sille sopivan pH:n ollessa hieman korkeampi kuin PIX-322:lla.

5.2 Pilot-koeajot

Koesuodattimilla suodatettu vesi saatiin laadultaan melko hyväksi lukuun ottamatta niitä päiviä, jolloin selkeytysaltaan toiminta häiriintyi pohjalietteen kertymisen takia. PAX-XL60:tä käytettäessä vesi täytti Sosiaali- ja terveysministeriön asettamat talousveden laatusuosituksukset. PIX-322:tä käytettäessä veden rautapitoisuus ylitti suosituksen, mutta kemikaalia kokeiltiin vain yhtenä päivänä PAX-XL60:n toimiessa hyvin ja sille sopivan selkeytyksen pH:n sopiessa paremmin laitokselle.

Koelaitteiston ajon aikana permanganaattiluku poistui selkeytyksessä kohtuullisesti suuremmalla käytetyllä virtaamalla. Koelaitteiston selkeytysaltaaseen syötetyn dispersioveden määrä oli liian pieni suhteessa altaan kokoon, joten laitoksen toimivassa flotaatioselkeytyksessä tuloksen pitäisi olla parempi. Selkeytyksen toiminnan merkitys korostuu, kun raakaveden laatu heikkenee. PIX-322:tä käytettäessä selkeytyksen pH oli liian korkea (5,6), mutta kemikaalia ei kokeiltu uudestaan, koska PAX-XL60 toimi ja se toimii laitokselle suunnitteilla olevan kalkkikivialkaloinnin kannalta paremmalla pH-alueella.

Koeajoissa raakaveden permanganaattiluku oli 90–100 mg/l. Suodatetun veden permanganaattiluvut olivat melko alhaisia ottaen huomioon, että aktiivihiltä ei käytetty vielä tässä vaiheessa. Lisäämällä aktiivihiltä suodatinpatjaan suodatetun veden permanganaattilukua pitäisi saada vielä laskemaan ainakin hieman.

Metallijäännöstä oli selkeytetyn veden näytteissä melko paljon, mutta niitä voidaan pienentää optimoimalla saostuskemikaalin syöttömäärä sekä käyttämällä koagulantin lisäksi apukoagulanttia. Koelaitteistoa ajettaessa käytetty 100 ml/m³ oli hieman liian suuri annostus raakaveden laadun ollessa melko hyvää. Kemikaaliannostusta ei muutettu, koska laitteistoon ajettava vesimäärä oli pieni ja koelaitteiston selkeytyksen arvioitiin toimivan eri tavalla kuin laitoksen vastaava selkeytys. Liian suuresta annostuksesta huolimatta suodatetun veden näytteissä metallijäännös oli pieni PAX-XL60:tä käytettäessä, joten suodattimet poistivat metalleja hyvin molemmilla käytetyillä virtaamilla.

Jälkialkaloinnin korvaaminen käyttämällä kalkkikiveä suodattimilla näyttäisi kokeiden perusteella olevan mahdollista, koska pH ja alkaliteetti nousivat koesuodattimilla melko helposti käytettäessä mitoitusvirtaamaa vastaavaa pintakuormaa suodattimilla. Kalkkikivialkalointi näyttäisi toimivan sekä hiekka-kalkkikivisuhteella 1:2 että suhteella 2:1.

Virtaaman kasvattaminen kaksinkertaiseksi verrattuna saneeratun Jouppilanvuoren laitoksen normaalitilannetta vastaavaan virtaamaan (suodattimien pintakuormalla lasketuna) ei merkittävästi heikentänyt kalkkikivialkaloinnin tehoa kummallakaan hiekka-kalkkikivisuhteella lukuun ottamatta suodatetun veden alkaliteettia, joka jäi noin 0,03–0,16 mmol/l taulukossa 3.1. esitetyistä VVY:n suosituksista. Alkaliteetti oli korkeintaan noin 0,1 mmol/l korkeampi käytettäessä suodatinmassassa hiekka-kalkkikivisuhdetta 2:1 verrattuna hiekka-kalkkikivisuhteeseen 1:2.

Eroa laitoksen suodattimien ja koesuodattimien välillä voi aiheuttaa patjan kerrostuneisuus. Koesuodattimilla hiekka ja kalkkikivi olivat omina kerroksinaan, kun taas laitoksen suodattimilla ne käyttökokemusten perusteella sekoittuvat huuhteluiden vaikutuksesta (Vuorilehto 2016a, Otamo 2016).

Kokonaisuutena koelaitteistoa ajettaessa otetut näytteet olivat laadultaan melko hyviä, etenkin ottaen huomioon tekniset ongelmat laitteiston toiminnassa. PAX-XL60 toimi hyvin, ainakin raakaveden laadun ollessa hyvää. Koelaitteiston ajon perusteella päätettiin tilata pelkästään PAX-XL60:tä käytettäväksi laitoksen koeajoissa. Koesuodattimien toiminnan perusteella suodattimille sopivaksi massaksi arvioitiin kalkkikivi-hiekkaseos suhteella 1:1. Tätä suhdetta päätettiin kokeilla laitosmittakaavan koeajojen aikana vielä koelaitteistoa isommalla pilot-suodattimella mittakaavasta aiheutuvien virheiden poistamiseksi ja tulosten luotettavuuden parantamiseksi.

Verrattaessa koelaitteistolla tehtyjen kokeiden tuloksia Helsingissä Pitkäkosken vesilaitoksella vuonna 2009 tehtyihin pilot- ja bench-mittakaavan kokeisiin (Hiillos 2012) havaitaan tulosten olevan hyvin samanlaisia: hiekan suhteellisen osuuden kasvattaminen mixed-bed-suodattimen suodatinmassassa vaikutti suodatetun veden kovuuteen hyvin vähän, korkeintaan 0,06 mmol/l, ja suodattimet nostivat käsiteltävän veden pH:ta hyvin.

5.3 Laitosmittakaavan koeajot

Laitoksen raakaveden laadun takia puhdistusprosessin tehon kannalta tärkeimmät parametrit ovat rauta- ja alumiinijäännös sekä permanganaattiluku. Kalkkikivialkaloinnin tehoa puolestaan kuvaavat veden pH- ja alkaliteettiarvot. Yhteenveto laitosmittakaavan koeajojen aikana otetuista näytteistä tehdyistä analyyseistä näiden parametrien vaihteluvälin osalta on koottu taulukkoon 5.3. Koeajoissa käytetty virtaama oli hieman laitoksen saneerauksen jälkeistä mitoitusvirtaamaa (15000 m³/d) suurempi selkeytettyä vettä tarkasteltaessa. Suodattimelle ohjattua virtaamaa vaihdeltiin virtaaman ollessa hieman saneeratun laitoksen normaalitilanteen virtaamaa suurempi.

Taulukko 5.3 Yhteenveto laitosmittakaavan koeajojen tuloksista

Näyte	Raakavesi	Selkeytetty vesi	Suodatettu vesi
pH	6,5–6,6	5,4–5,9	7,5–7,6
Alkaliteetti (mmol/l)	0,17–0,19	0,03–0,05	0,46–0,54
Rauta (µg/l)	2400–2500	110–370	21–68
Alumiini (µg/l)	570–740	660–1900	160–280
KMnO ₄ -luku (mg/l)	140–150	27–41	22–26

Selkeytetyn veden osalta tulokset olivat melko hyviä. Erityisesti viimeisenä päivänä saadut parhaat laatu tiedot ovat riittävän hyviä PAX-XL60:n toiminnan luotettavaan toteamiseen Jouppilanvuoren laitoksella. Parhaan vedenlaadun tuottaneessa viimeisen päivän

koeajossa saostuskemikaalin annostus oli milligrammoina litrassa noin 1,0-kertainen permanganaattilukuun nähden ja flotaation pH oli 5,7–5,9. Apukoagulantin vaihtaminen ei vaikuttanut selkeytetyn veden laatuun, joten laitoksella voidaan käyttää Ciba Magnafloc LT31:n sijaan Seinäjoen Veden toisella pintavesilaitoksella käytettyä SNF Finlandin Floquat FL2650SEP:tä, mikäli jälkimmäinen osoittautuu halvemmaksi.

Suodattimen toimintateho oli odotettua alhaisempi niin veden puhdistuksen kuin myöskin alkaloinnin osalta. Alkaloinnin osalta asiaa selvittäessä todennäköiseksi syyksi paljastui vedessä olevan hiilidioksidin määrän lasku pilot-laitteiston ajan jälkeen. Jouppilanvuoren laitoksen raakaveden hiilidioksidipitoisuutta ei ole seurattu säännöllisesti, mutta satunnaisia laatutietoja on saatavilla. Näistä esimerkiksi 28.4.2014 raakavesinäytteessä hiilidioksidia on ollut vain 4,6 mg/l (Seinäjoen Vesi Oy 2014). Alkaliteetin nousu selkeytetyn veden 0,05:stä suodatetun veden 0,5:een vaatii laskennallisesti taulukon 2.3 mukaan hiilidioksidia noin 9,9 mg/l, joten hiilidioksidin loppuminen on hyvin mahdollista. Tätä teoriaa tukee myös se, että pH nousi suodattimella saman verran eri virtaamilla. Myöhemmin mitattiin pH:ta myös suodattimella yli viikonlopun olleesta vedestä ja pH oli 7,85 (käsittäjä oli näyttänyt 0,2–0,3 laboratorion tuloksia enemmän läpi käsittelykokeiden), joten pH ei noussut kunnolla kontaktiajasta riippumatta.

Viimeisen päivän koeajojen tuloksia aiempaan mixed bed-suodattimen käyttöön keskittyvään tutkimukseen (Hiillos 2012) verrattaessa (taulukko 5.4) havaitaan, että vaikka Jouppilanvuoren vesilaitoksen suodatintilavuus on rajallinen, on se normaalitilanteen virtaamaan nähden suuri. Kovuus ja pH pysyvät pitkä viipymä huomioiden yllättävän alhaalla, mikä entisestään vahvistaa teoriaa reaktion keskeytymisestä veden hiilidioksidin loppumisen seurauksena. Lisäksi Jouppilanvuoren laitoksen suodatintilavuuden pitäisi hyvin riittää veden alkaloimiseen mixed bed-suodattimien avulla. Helsingissä suodatinmassana käytettiin 1:2 kalkkikivi-hiekkaseosta, kun koeajoissa käytössä oli 1:1 kalkkikivi-hiekkaseos. Helsingin kokeiden kovuudet on taulukossa muunnettu °dH:sta mmol/l:ssa kertomalla ne luvulla 0,18 (Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä).

Taulukko 5.4 Tulosten vertailu aiempaan tutkimukseen

	Koeajot 25.11.2016		Aiemmat kokeet Helsingissä	
	Selkeytetty vesi	Suodatettu vesi	Selkeytetty vesi	Suodatettu vesi
Suodatusnopeus (m/s)		0,9		6,7
Tehollinen viipymä (min)		78		4
pH	5,7–5,9	7,6	4,9	7,0–8,5
Kovuus (mmol/l)	ei mitattu	0,50–0,52	0,20	0,41–0,54
Alkaliteetti (mmol/l)	0,04–0,05	0,46–0,48	0,03	0,4–0,6

Vanhankaupungin vesilaitoksella Helsingissä käytetty hiekka-kalkkikivisuodattimella jatkuvassa käytössä 3,6 m/h ja suurimmillaan jopa 5,4 m/h suodatusnopeuksia (Vuori-

lehto 2016b). Jouppilanvuoren saneeratulla vesilaitoksella laskennallinen suodatusnopeus on alle 0,55 m/h normaalitilanteessa ja 4,1 m/h mitoitustilanteessa, joten kontakti-aika suodattimilla pitäisi olla riittävä.

Suodattimen huonon puhdistustehon syitä pohdittaessa kävi ilmi, että Jouppilanvuoren laitoksella oli vuoden 2011 saneerauksen yhteydessä jätetty vaihtamatta hiekka käytöstä poistettuun suodattimeen. Lisäksi tämän suodattimen päällä on välillä ollut lumetustarkoituksessa laitokselle pumpattua puhdistamatonta raakavettä, eikä suodatinta ole huuhdeltu lainkaan. Tämä ei ollut pilot-suodatinta valmisteltaessa tiedossa ja pilot-suodattimen hiekka otettiin juuri tästä käytöstä poistetusta laitoksen suodattimesta. Näiden syiden takia on perusteltua epäillä, että pilot-suodattimelle otettu hiekka oli hyvin likaista, mikä aiheutti huonon puhdistustehon. Raakaveden korkean humuspitoisuuden takia veden permanganaattiluku kuvaa puhdistustehoa hyvin. Vertailtaessa suodatinten toimintaa laitosmittakaavan koeajojen ja koelaitteiston ajon aikana (taulukko 5.5) nähdään, että koelaitteiston ajon aikana käytetyt suodattimet puhdistivat vettä selvästi tehokkaammin selkeytyksestä tulevan veden heikommasta laadusta huolimatta.

Taulukko 5.5 Suodatustehon vertailua

	Koelaitteiston ajo (9.11.2016)		Laitosmittakaavan koeajot (25.11.2016)	
	Suodattimelle tuleva	Suodatettu	Suodattimelle tuleva	Suodatettu
Rauta (µg/l)	500	4,5–5,7	110–120	21–27
Alumiini (µg/l)	1800	< 20	660	170–190
Permanganaattiluku (mg/l)	27	11–12	27–28	22
Sameus	ei määritetty	0,22–0,25	ei määritetty	0,31–0,37

Mikäli suodatuksen teho ei parane riittävästi puhdasta hiekkaa käytettäessä, voidaan mixed bed-suodattimille kokeilla aktiivihieksen lisäämistä. Aktiivihieki on huokoinen materiaali, joka adsorboi orgaanisia yhdisteitä tehokkaasti (Karttunen et al. 2004). Aktiivihiekiä kokeiltiin lyhyesti aiemmin lisätä Jouppilanvuoren laitoksen hiekkasuodattimille raakaveden korkean humuspitoisuuden takia, mutta tällöin ongelmaksi muodostui hiekin karkaaminen huuhteluveden mukana (Kaunismäki 2016). Tarkasti toteutetulla huuhtelulla tämä on kuitenkin saatu toimimaan Helsingissä (Luukkonen 2016). Toinen vaihtoehto on muuntaa laitoksen kuudes suodatin aktiivihieksisuodattimeksi, jonka kautta ohjattaisiin osa vedestä. Tällöin alkalointiin käytettäviä mixed bed-suodattimia jäisi viisi. Kokeiden perusteella viiden suodattimen tilavuuden pitäisi riittää veden jälkialkalointiin normaalitilanteen virtaamalla.

Zolasin (2010) kokeissa mixed bed-suodatin toimi raudan- ja sameuden reduktion osalta hiekkasuodatinta paremmin ja orgaanisen aineksen pidätyksessä suunnilleen yhtä hyvin hiekkasuodattimeen verrattuna. Tämän perusteella vaikuttaisi, että mixed bed-suodattimen heikko suodatusteho aiheutui suodatinmassan likaisuudesta, eikä suodattimen lähtökohtaisesta toimimattomuudesta.

Aiempien käyttökokemusten perusteella Jouppilanvuoren vesilaitoksen prosessi toimii huonoiten raakaveden ollessa kylmää (Kaunismäki 2016). Raakaveden lämpötila oli koeajojen aikaan noin 3,0 °C, joten laitoksen toiminnan ei pitäisi merkittävästi heikentyä koeajojen tilanteesta.

5.4 Jouppilanvuoren laitoksen saneeraus

Käsittelykokeiden tavoitteena oli tuottaa tietoa Jouppilanvuoren vesilaitoksen saneeraukseen. Merkittävimmät saneerauksen tavoitteet olivat laitoksen automatisointi sekä laitoksen kemikaloinnin muuttaminen vähemmän hoitoa vaativaksi (Puska 2015). Lisäksi suunnittelun edetessä harkintaan otettiin raakavesipumppaamon siirto ja jälkialkaloinnin korvaaminen suodattimille lisättävän kalkkikiven avulla.

Yleisesti käsittelykokeiden, erityisesti lopussa suoritettujen laitosmittakaavan koeajojen aikana havaittiin tarve laitokselta tulevien jätevesien käsittelylle. Laitoksen toimittua varalaitoksena suodattimien ja selkeyttimien huuhteluvedet oli ohjattu suoraan ympäristöön, mikä ei olisi enää mahdollista laitoksen toimiessa jatkuvassa käytössä.

Tärkeimmät käsittelykokeista saatavan tiedon pohjalta suunniteltavat prosessiyksiköt olivat ennakkoon raakaveden hankinta, esialkalointi ja saostus sekä jälkialkalointi. Seuraavassa käsitellään näihin prosessiyksiköihin käsittelykokeiden pohjalta valitut saneerausratkaisut.

5.4.1 Raakaveden hankinta

Kyrkösjärvestä ja Törnävän pumppaamolta 2016 huhti–joulukuussa jokivesi on ollut parhaimmillaan järven vettä parempilaatuista mutta myös laadultaan epätasaisempaa. Jouppilanvuoren vesilaitoksen nykyisen raakaveden laatu vaihtelee voimakkaasti erityisesti keväällä sulamisvesien aikaan sekä sateisten jaksojen aikana kesäisin (Päkkilä 2016). Kyrkösjärven vesi on jokivettä tasalaatuisempaa, mikä on otettava huomioon käsittelykokeiden tuloksia tarkasteltaessa. Tasalaatuisempi raakavesi helpottaisi laitoksen ohjausta ja parantaisi sen toimintavarmuutta, mikä on ensiarvoisen tärkeää Jouppilanvuoren vesilaitoksen toimiessa varavesilaitoksena.

Kokeiden alun astiakokeiden perusteella saostuksen teho laskee merkittävästi raakaveden laadun heikentyessä, erityisesti sen permanganaattiluvun (KMnO_4 -luku) noustessa yli 200 mg/l. Laitoksen toimintavarmuuden ollessa erityisen tärkeää sen toimiessa Seinäjoen alueen varavesilaitoksena astiakokeiden tulokset puoltavat uuden raakavesipumppaamon rakentamista vanhan pumppaamon saneeraamisen sijaan. Toimintavarmuuden lisäksi laitoksen ohjaaminen on helpompaa raakaveden laadun vaihdellessa vähemmän.

Jokirannassa sijaitseva vanha raakavesipumppaamo on melko huonossa kunnossa, joten saneeraus tulisi melko kalliiksi. Pumppujen lisäksi pumppaamon sähkökeskus jouduttaisiin uusimaan kokonaan. Nykyiseltä raakavesipumppaamolta laitokselle kulkeva raakavesiputki ohittaa järven läheltä, joten samaa putkea voidaan hyödyntää mikäli uusi pumppaamo päätetään rakentaa. Lisäksi raakavesipumppaamon siirto pienentäisi raakavesipumpuilta vaadittavaa nostokorkeutta noin 30 metriä alentaen pumppaamon käyttökustannuksia merkittävästi. Pumppaamon siirto oli alun perin tarkoitus tehdä tarvittaessa jälkikäteen, mutta suuren nostokorkeuseron takia vanhalle pumppaamolle hankittavia uusia pumppuja ei olisi taloudellisesti järkevää käyttää Kyrkösjärven rantaan rakennettavassa pumppaamossa, jolloin jouduttaisiin hankkimaan taas uudet pumpput. Näin ollen pumppaamon siirto on järkevää suorittaa samalla kertaa laitoksen saneerauksen kanssa turhien kustannusten välttämiseksi. (Puska 2015) Uuden pumppaamon rakentamisen ja vanhan pumppaamon saneerauksen aiheuttamat kustannukset voivat olla yllättävän lähellä toisiaan, minkä lisäksi käyttökustannus on pumppaamon uudella sijainnilla merkittävästi pienempi.

Kokonaisuutena uuden pumppaamon rakentaminen vaikuttaa vanhan pumppaamon saneerausta järkevämältä ratkaisulta. Tärkeimmät perusteet uuden pumppaamon rakentamiselle ovat laitoksen toimintavarmuuden parantaminen ja toisaalta vanhan pumppaamon saneeraamisen ja uuden pumppaamon rakentamisen välisten kustannusten ero, joka on todennäköisesti ennakoitua pienempi.

5.4.2 Esialkalointi ja saostus

Laitoksen saneerauksen alustavan yleissuunnitelman (Puska 2015) mukaan laitoksella oli tarkoitus käyttää kalkkia esialkaloinnissa ja PIX-322:ta saostuskemikaalina. PIX-322 oli valittu, koska se toimi paremmin kuin PAX-XL60 vuonna 2011 suoritetuissa koeajoissa (Kaunismäki 2016).

Koeajopäiväkirjan (Päkkilä 2015) perusteella todennäköisin syy PAX-XL60:n huonoon toimivuuteen koeajojen aikana on ollut selkeytyksessä käytetty liian korkea pH. PIX-322:ta oli vuoden 2011 koeajojen aikana kokeiltu käsittelykokeiden aikana todetussa saostuksen optimi-pH:ssa (4,3). PAX-XL60 käytön aikana pH oli ollut koko ajan vähintään 6,6, kun se käsittelykokeiden perusteella pitäisi olla noin 5,8 selkeytyksen tehokkaan toiminnan varmistamiseksi.

Käsittelykokeiden perusteella sekä PAX-XL60 että PIX-322 toimivat Jouppilanvuoren laitoksella. Kemikaaleista PAX-XL60 toimii hieman korkeammassa saostuksen pH:ssa vähentäen suodattimella tarvittavaa kontaktiaikaa, mikäli kemiallinen jälkialkalointi päätetään korvata lisäämällä kalkkikiveä suodattimelle. Laitoksen suodattimien tilavuuden ollessa rajallinen vaaditun kontaktiajan pienentäminen parantaa kalkkikivialkaloinnin toi-

5.4.3 Jälkialkalointi

Käsittelykokeiden perusteella Jouppilanvuoren laitoksen suodattimien tilavuus on riittävä kemiallisen jälkialkaloinnin korvaamiseen suodattimille lisättävän kalkkikiven avulla normaalitilanteen virtaamalla ja sitä hieman suuremmilla virtaamilla. Virtaaman kasvaessa lähemmäs mitoitustilannetta tilavuus ei kuitenkaan käsittelykokeiden perusteella riitä jälkialkalointiin tarvittavan kalkkikiven sijoitukseen suodattimille hiekan lisäksi. Laitoksen kuudennen suodattimen käyttöönottoon vaadittavat toimenpiteet ovat melko pienet, joten ne kannattanee tehdä kalkkikivialkaloinnin toimivuuden varmistamiseksi.

Mitoitusvirtaaman toteutuminen on laitoksella erittäin harvinaista. Laitosta joudutaan ajamaan täydellä teholla vain, jos laitoksen varavesikäytön vaativa poikkeustilanne tapahtuu samaan aikaan Nurmon Lihakylän tuotantolaitoksen huippukulutuksen kanssa (Puska 2015).

Alustavan yleissuunnitelman (Puska 2015) mukaan vuonna 2011 uusitut kemikaalisiilot on tarkoitus jättää saneerauksessa paikoilleen. Näin ollen saneeratulla laitoksella on mahdollista käyttää väliaikaisesti nykyistä kemiallista jälkialkalointia, mikäli suodattimilla oleva kalkkikivi ei riitä nostamaan veden alkaliteettia riittävästi. Kemialliseen jälkialkalointiin joudutaan turvautumaan vain poikkeustilanteissa, joita tulee todennäköisesti hyvin harvoin. Tilanteiden harvinaisuuden vuoksi niistä aiheutuvilla lisäkustannuksilla ei ole käytännön merkitystä laitoksen käyttökustannuksia arvioitaessa.

Merkittävin käsittelykokeiden aikana ilmennyt ongelma suodattimelle laitettavan kalkkikiven käyttämiseen jälkialkaloinnin korvaajana oli laitoksen käyttämän raakaveden vaihteleva hiilidioksidipitoisuus. Hiilidioksidia voidaan tarvittaessa syöttää veteen esimerkiksi suodattimille menevään kouruun, mutta ensin tulee selvittää raakavesipumppaamon siirrosta aiheutuvat vaikutukset veden hiilidioksidipitoisuuteen. Kyrkösjärven hiilidioksidipitoisuus lisättiin kuukausittain haettavasta näytteistä tehtäviin analyyseihin vaikutuksen selvittämiseksi. Hiilidioksidin syöttö voidaan lisätä prosessiin jälkikäteen tilanteen niin vaatiessa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Jouppilanvuoren vesilaitoksen nykyisellään käyttämän raakaveden laadun vaihdellessa voimakkaasti on laitoksen toimintavarmuuden kannalta järkevää rakentaa uusi pumppaamo Kyrkösjärven rantaan vanhan jokirannassa sijaitsevan pumppaamon saneeraamisen sijaan. Astiakokeiden aikana jokiveden permanganaattiluku nousi sateiden takia yli 200 mg/l, jolloin puhdistusteho heikkeni selvästi. Laitoksen toimintavarmuus on erityisen tärkeää sen toimiessa jatkuvan käyttönsä lisäksi Seinäjoen seudun talouksien varavesilaitoksena, minkä lisäksi tasaisempi raakaveden laatu helpottaa laitoksen ohjaamista. Paremman raakaveden lisäksi uuden pumppaamon rakentamista puolsi vanhan pumppaamon heikosta kunnosta aiheutuvat kalliit saneerauskustannukset sekä uuden pumppaamon sijainnin ansiosta saatavat säästöt laitoksen käyttökustannuksissa.

Laitoksen selkeytyslaitaiden suuren koon vuoksi viime vuosien varavesikäytössä toiminnassa olleet kaksi allasta riittävät käsittelemään mitoitustilanteen virtaamaan. Pienin selkeytysallas voidaan näin saneerata muuhun käyttöön, esimerkiksi kemikaalien varastointiin. Selkeytysaltaan saneeraus kemikaalien varastointiin poistaisi tarpeen suunnitellun laajennuksen rakentamiseen ja vähentäisi näin laitoksen saneerauskustannuksia merkittävästi. Lisäksi käsittelykokeissa veden esialkalointiin käytetyn natriumhydroksidin käyttö oli hyvin helppoa, joten laitokselle suunniteltu kalkkialkalointi päätettiin korvata natriumhydroksidilla.

Käsittelykokeiden aikana käytetyistä saostuskemikaaleista PAX-XL60 toimi hieman paremmin kuin PIX-322, minkä lisäksi sille sopiva saostuksen pH oli parempi laitokselle jälkialkaloinnin korvaamiseen suunniteltu mixed-bed-suodatuksen kannalta. Kokeiden perusteella PAX-XL60:lle hyvä saostuksen pH on noin 5,8 ja annostus noin 1,0-kertainen raakaveden permanganaattilukuun nähden milligrammoina litrassa, joten sen käyttöönottoa saneerauksen yhteydessä suositeltiin.

Laitokselle suunniteltu jälkialkaloinnin lisääminen hiekkasuodattimiin lisättävän kalkkikiven avulla vaikuttaisi laitoksen normaalitilanteen virtaamalla toimivalta ratkaisulta suodatintilavuuden ollessa melko suuri virtaamaan nähden. Verrattuna aiempiin kokeisiin ja käyttökokemuksiin käsiteltävän veden tehollinen viipymä suodattimissa on riittävä, joten mixed bed-suodattimien käyttöä suositeltiin. Raakaveden hiilidioksidipitoisuuden vaihtelut saattavat aiheuttaa heilahtelua käsitellyn veden pH:ssa, joten laitoksen nykyiseltä jokirannan pumppaamolta ja suunnitellulta raakavesilähteeltä Kyrkösjärveltä kuukausittain haettavista näytteistä tutkittavien analyysien listaan lisättiin hiilidioksidipitoisuuden määrittäminen vaihtelun selvittämiseksi. Tarvittaessa saneeratulle laitokselle voidaan jälkikäteen lisätä hiilidioksidinsyöttö suodattimille menevään veteen.

Normaalitilanteen virtaaman ja mitoitusvirtaaman suuren eron takia on mahdollista, ettei mixed bed-suodattimien tilavuus riitä kemiallisen jälkialkaloinnin korvaamiseen mitoitustilanteessa. Mitoitusvirtaama toteutuu laitoksilla kuitenkin hyvin harvoin. Laitoksella vuonna 2010 uusitut kemikaalisiilot on tarkoitus jättää paikoilleen, joten tarvittaessa niiden avulla voidaan syöttää jälkialkalointikemikaalia mitoitusvirtaaman aikana alkaloinnin tehostamiseksi. Mitoitusvirtaaman toteutumisen harvinaisuuden takia tällä ei ole käytännön merkitystä laitoksen käyttökustannuksiin.

Suodatinten puhdistusteho jäi laitosmittakaavan koeajojen aikana odotettua heikommaksi. Todennäköinen syy tähän oli pilot-suodattimessa käytetyn hiekan likaisuus, mitä ei tiedetty suodatinta valmisteltaessa. Koelaitteistoa ajaessa käytetyillä suodattimilla saatiin selvästi heikommasta suodattimille tulevan selkeytetyn veden laadusta huolimatta parempilaatuista suodatettua vettä. Selkeytetyn veden laatu oli laitosmittakaavan koeajojen viimeisenä päivänä lopullista kemikaaliannostusta käytettäessä hyvä, vaikka vesi oli hyvin kylmää ja laitoksen prosessi toimii aiempien käyttökokemusten perusteella heikoimmin kylmällä vedellä. Mikäli puhdistustehoa halutaan edelleen parantaa, on mahdollista kokeilla aktiivihiiilen toimintaa joko käyttämällä kuudetta suodatinta pelkkänä aktiivihii-lisuodattimena ja muita viittä mixed bed-suodattimina, joiden massana on kalkkikiven ja hiekan sekoitus, tai lisäämällä kaikkiin suodattimiin kalkkikiven ja hiekan sekoituksen lisäksi aktiivihiihtä.

LÄHTEET

- Boynton, R.S. (1980). Chemistry and Technology of Lime and Limestone. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc.. 592 s.
- Forsberg, M. (2009). Kiinteistöjen metallisten käyttövesiputkistojen ja -laitteistojen kestävyys. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos.
- GeoFoorumi. (2010). Kaivosalan buumi kasvattaa kalkkikiven kysyntää. Geologian tutkimuskeskuksen sidosryhmälehti GeoFoorumi 2/2010. Verkkolehti. Saatavissa (viitattu 28.6.2017): <http://www.geofoorumi.fi/20102/sivu2.html>
- Geology.com. Limestone: What Is Limestone and How Is It Used? [www]. Saatavissa (viitattu 29.6.2017): <http://geology.com/rocks/limestone.shtml>
- Haapakoski, T. (2014). Vesihuollon saneerausinvestointien strateginen ohjaus. Vesitalous 2/2014, s. 5–8.
- Hietala, J. (2000). Kalkkikivialkaloinnin tehostaminen ja mitoitus. Diplomityö. Oulun yliopisto. Rakentamistekniikan osasto.
- Hiillos, K., Voutilainen, V. & Härkki, H. (2012). Mixed-bed-suodatus pintaveden käsittelyssä. Vesitalous 3/2012, s. 15–19.
- Hiillos, K. (2012). Mixed bed –suodatus pintaveden käsittelyssä. Esitysmateriaali. Vesihuolto 2012 -päivät 23.–24.5.2012, Oulu. Vesi- ja viemärlaitosyhdistys.
- Iivari, H. (2008). Kalkkikivisuodatin pikasuodattimena Oulun Veden Kurkelanrannan pintavedenpuhdistamolla. Diplomityö. Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto.
- Jouppila, A., & Päckilä, J. (2010). Jouppilanvuoren vesilaitos: prosessikaavio. Seinäjoen Vesi Oy. Sisäinen asiakirja.
- Kaunismäki, K. (2016). Vesilaitoksenhoitaja, Lakeuden Vesi Oy. Haastattelu. 25.11.2016.
- Karttunen, E & Tuhkanen, T. (2003). RIL 124-1 Vesihuolto I. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 314 s.
- Karttunen, E., Tuhkanen, T. & Kiuru, H. (2004). RIL 124-2 Vesihuolto II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 684 s.
- Kemira. (2011). Kemira PAX-XL60: Tuotetiedot. Kemira Oyj, Helsinki.
- Kemira. (2008). Kemwater™ PIX-322: Tuotetiedot. Kemira Oyj, Helsinki.

Korkka-Niemi, K., Vanhanarkaus, O., Rännäli, M. & Virtanen, P. (2012). Kalkkikivialkalointi rengaskaivojen kunnostusmenetelmänä. *Vesitalous* 6/2012, s. 20–23.

Kuorikoski, A & Palomäki, J. (2001). Kalkkikivialkalointi Länsi-Suomen ympäristökeskuksen alueen vesilaitoksilla. Alueellinen ympäristöjulkaisu. Länsi-Suomen ympäristökeskus.

Laakso, P. (1997). Pohjavesilaitosten kehittäminen. *Vesi- ja viemärlaitosyhdistys*. 93 s.

Luukkonen, P. (2016). Käyttömestari, Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä. Sähköpostiviesti 13.12.2016.

Meriluoto, J. (2002). Kalkkikivialkalointi – opas veden syövyttävyyden vähentämiseksi. *Vesi- ja viemärlaitosyhdistys*. 27 s.

Otamo, R. (2016). Vastaava käyttömestari, Kurkelanrannan vesilaitos, Oulu. Sähköpostiviesti 2.12.2016

Oy Erikstone Ab. Kalkkikivi [www]. Saatavissa (viitattu 27.6.2017): <https://www.erikstone.com/kivilajit/kalkkikivi/>

Puska, J. (2015). Seinäjoen Vesi Oy: Pintavesi Jouppilanvuorelta Atrialle. Yleissuunnitelma. Ramboll.

Päkkilä, J. (2015). Jouppilanvuoren koeajot 2011: Koeajopäiväkirja. Seinäjoen Vesi Oy. Sisäinen asiakirja.

Päkkilä, J. (2016). Käyttöpäällikkö, Seinäjoen Energia Oy/Seinäjoen Vesi. Haastattelu. 8.12.2016.

Rautiainen, M. (2017). ”Vesilaitokset jääneet jälkeen kansainvälistymisessä” – professori vaatii isompia laitoksia [www]. *Tekniikka & talous*. Saatavissa (viitattu 16.12.2017): <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/vesilaitokset-jaaneet-jalkeen-kansainvalistymisessa-professori-vaatii-isompia-laitoksia-6624968>

Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L. & Meriläinen, P. (2006). MAOL-taulukot. Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto MAOL ry. 167 s.

Seinäjoen Vesi Oy. (2014). Vedenlaatutuloksia. Sisäinen asiakirja.

Seinäjoen Vesi. Seinäjoen Energia-konserni – Sähköä, lämpöä ja vettä Seinäjoen parhaaksi [www]. Saatavissa (viitattu 27.10.2017): http://www.seinajoenvesi.fi/Seinajoen_Vesi

Sosiaali- ja terveysministeriö. (2015). Asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. Saatavissa (viitattu 7.3.2017): <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151352#Pidp1581360>

Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä. Veden kovuus [www]. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): <http://www.tsvesi.fi/veden-laatu/veden-kovuus/>

Ulvila, M. (2008). Saostuskemikaalien valinta runsashumuksisen pintaveden puhdistuksessa. Opinnäytetyö. Pirkanmaan ammattikorkeakoulu. Laboratorioalan koulutusohjelma.

Vesi- ja viemärlaitosyhdistys. (2000). Soveltamisopas talousvesiasetukseen 461/2000. 37 s.

Vesilaitosyhdistys. (2016). Välttämätön vesi [www]. Saatavissa (viitattu 27.10.2017): https://www.vvy.fi/files/5208/valttamaton_vesi_vvy_2016_netti.pdf

Vuorilehto, V-P. (2016a). Osastonjohtaja, vedenpuhdistus, Helsingin seudun ympäristöpalvelut - kuntayhtymä. Sähköpostiviesti 1.12.2016.

Vuorilehto, V-P. (2016b). Vanhankaupungin vedenpuhdistuslaitoksen hiekka-kalkkikivisuodatus: ensimmäisiä käyttökokemuksia. Esitysmateriaali 2.11.2016.

Zolas, S. (2010). Mixed bed –suodatus osana vedenpuhdistusprosessia. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma/koulutusohjelma.

Törnävän RV-pumppaamo	Päivä	Alkaliteetti (mmol/l)	Mangaani (µg/l)	KMnO4 (mg/l)	pH	Fe (µg/l)	Sähkönjohtavuus (µS/cm)	Hiilidioksidi (mg/l)
	5.4.2016	0,24	28	99	7,0	2 600	97	
	6.5.2016	0,11	100	140	6,2	1 600	81	
	13.6.2016	0,18	55	120	6,9	2 800	69	
	21.6.2016	0,06	160	210	5,6	1 700	74	
	18.7.2016	0,11	80	190	6,1	2 300	77	
	16.8.2016	0,02	110	300	5,2	2 300	73	
	6.9.2016	0,16	62	120	6,7	3 000	72	
	13.10.2016	0,25	28	110	6,9	2 900	86	
	2.11.2016	0,24	28	99	7,0	2 600	97	
	29.11.2016	0,11	91	180	6,1	2 400	91	17
Kyrkösjärvi	Päivä	Alkaliteetti (mmol/l)	Mangaani (µg/l)	KMnO4 (mg/l)	pH	Fe (µg/l)	Sähkönjohtavuus (µS/cm)	
	5.4.2016	0,10	92	110	6,2	1 200	53	
	6.5.2016	0,07	76	130	6,0	1 200	49	
	13.6.2016	0,08	79	120	6,5	1 500	42	
	21.6.2016	0,09	71	110	6,6	1 400	40	
	18.7.2016	0,10	100	140	6,6	2 000	49	
	16.8.2016	0,11	50	130	6,7	2 100	49	
	6.9.2016	0,10	68	130	6,5	2 200	50	
	13.10.2016	0,11	41	130	6,5	2 200	49	
	2.11.2016	0,11	31	110	6,6	2 100	51	
	29.11.2016	0,13	56	120	6,6	2 000	63	6,5

Päivä	Näyte	Virtaama (l/h)	pH	Alkaliteetti (mmol/l)	Al (µg/l)	Mn (µg/l)	Fe (µg/l)	KMnO4 (mg/l)	Absorb.	Sameus	Kovuus (mmol/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Muuta
PAX 25.10.	Raakavesi		8,1	0,43	280	22	2000	91	1,004					Raakavedessä lipeä mukana
25.10.	Flotaatio	150	7,3	0,42	560	7,8	120	18	0,125					2h jälkeen
25.10.	Flotaatio	150	7,4	0,41	540	83	8,5	14	0,097					4h jälkeen
25.10.	Lähtevä	4	7,1	0,22	<20	6,4	4,3	16	0,076	<0,20	0,33	1,80	10	Hiekkasuodatettu. Suodattimelle menevä vesi flotaatio 4h jälkeen
25.10.	Lähtevä	4	8,1	0,73	51	2	37	10	0,067	4,11	0,63	5,50	16	Suodatin hkkk 2:1. Suodattimelle menevä vesi flotaatio 2h jälkeen
25.10.	Lähtevä	4	8,2	1,00	<20	<1,1	<20	8,7	0,039	0,39	0,63	8,90	11	Suodatin hkkk 1:2. Suodattimelle menevä vesi flotaatio 4h jälkeen
PAX 27.10.	Raakavesi		8,7	0,42	280	23	2400	90	1,012					Raakavedessä lipeä mukana, POHJALJETETTÄ ALTAASSA
27.10.	Flotaatio	150	6,8	0,31	4200	13	760	66	0,369					
27.10.	Lähtevä	4	8,5	0,58	120	5,7	140	7,6	0,066	10,3	0,94	7,10	26	Suodatin hkkk 2:1
27.10.	Lähtevä	4	8,5	0,67	240	6,7	210	9,4	0,068	7,1	1,00	9,00	27	Suodatin hkkk 1:2
PAX 28.10.	Raakavesi		7,0	0,26	290	23	2600	99	1,309					POHJALJETETTÄ ALTAASSA
28.10.	Flotaatio	300	6,5	0,21	5200	14	1000	49	0,668					
28.10.	Lähtevä	8	8,4	0,55	290	<1,1	43	14	0,364	0,21	0,55	2,90	17	Suodatin hkkk 2:1
28.10.	Lähtevä	8	8,3	0,60	100	<1,1	9,6	10	0,345	<0,20	0,57	3,60	17	Suodatin hkkk 1:2
PIX 3.11.	Raakavesi		9,8	0,85	290	26	2600	98	1,080					Raakavedessä lipeä mukana
3.11.	Flotaatio	300	5,6	0,02	150	24	7100	35	0,488					
3.11.	Lähtevä	8	8,3	0,44	<20	<1,1	550	13	0,144	1,76	0,50	3,10	15	Suodatin hkkk 2:1
3.11.	Lähtevä	8	8,3	0,56	<20	1,3	980	13	0,185	2,81	0,54	3,90	15	Suodatin hkkk 1:2
PAX 9.11.	Raakavesi		7,9	0,46	290	33	2900	100	1,085					Raakavedessä lipeä mukana
9.11.	Flotaatio	300	5,9	0,06	1800	24	500	27	0,195					
9.11.	Lähtevä	8	8,2	0,44	<20	<1,1	5,7	12	0,069	0,25	0,54	3,60	16	Suodatin hkkk 2:1
9.11.	Lähtevä	8	8,3	0,57	<20	<1,1	4,5	11	0,059	0,22	0,59	4,50	16	Suodatin hkkk 1:2

Päivä	PAX- annostus (l/h)	PAX- annostus (g/m3)	Näyte	Alkaliteetti (mmol/l)	Al (µg/l)	Mn (µg/l)	KMnO4 (mg/l)	pH	Fe (µg/l)	Abs.	Kovuus (mmol/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	FNU	Virtaama suodattimelle (l/h)	Virtaama suodattimelle vastaa laitoksella (m3/h)	Muuta
23.11.			Raakavesi	0,19	740	71	140	6,6	2500	1,350							Lämpötila 3,0 °C
23.11.	55,2	112,1	Flotaatio	0,03	1900	64	39	5,4	360	0,265							
23.11.			Lähevä	0,54	280	4	26	7,6	68	0,182	0,57	18	2,7		436,4	191,1	
24.11.																	
24.11.			Raakavesi	0,19	660		140	6,6	2400	1,335							
24.11.	67,2	136,5	Flotaatio	0,05	1900		41	5,9	370	0,297							PAX-pumppu jumissa
24.11.			Lähevä	0,51	160		22	7,5	34	0,144	0,53	17	2,5	0,34	553,8	242,6	
25.11.																	
25.11.			Raakavesi	0,17	570		150	6,5	2400	1,365							Lämpötila 2,4 °C
25.11.	74,4	151,1	Flotaatio	0,04	660		27	5,7	110	0,156							
25.11.	74,4	151,1	Flotaatio	0,05	660		28	5,9	120	0,179							Floquat
25.11.			Lähevä	0,48	190		22	7,6	27	0,133	0,52	17	2,5	0,37	320,0	140,2	
25.11.			Lähevä	0,46	170		22	7,6	21	0,136	0,50	16	2,4	0,31	313,0	137,1	Floquat